

Spar 风电平台涡激运动特性研究

宋佳奇¹, 王俊荣^{1,2}, 王德志¹, 康信龙¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要:本文研究了无侧板单立柱 Spar 风电平台在不同约化速度(U_r)下的涡激运动特征。基于计算流体动力学进行数值模拟,采用剪应力运输(Shear Stress Transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型模拟漩涡脱落,通过自编动力积分程序和重叠网格实现涡激运动的实时流固耦合,对 U_r 为2~14时的平台涡激运动响应进行计算,分析涡激运动模式随 U_r 演变的规律,定性分析物理模型试验不满足雷诺数(Re)相似对涡激运动结果的影响。结果显示:平台分别在 $U_r=3.5\sim 4.5$ 和 $U_r=5\sim 10$ 时发生了纵荡和横荡锁频;物理模型试验不满足 Re 相似,高估了平台所受的黏性力。通过数值计算得出的平台涡激运动特性可为 Spar 风电平台相关设计分析与试验提供参考。

关键词:Spar 风电平台;涡激运动;流固耦合;浮式风电平台

中图分类号:P751

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2022)04-0037-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.04.004

引用格式:宋佳奇, 王俊荣, 王德志, 等. Spar 型浮式风电平台涡激运动特性研究[J]. 海岸工程, 2022, 41(1): 37-47. SONG J Q, WANG J R, WANG D Z, et al. Characteristics of vortex-induced motions of Spar-type floating wind turbine[J]. Coastal Engineering, 2021, 41(1): 37-47.

海洋风能资源丰富、风场稳定,海上风能资源开发已成为未来新能源开发的热点。Spar 风电平台具有水线面小、重心低等特点,因此拥有优良的运动性能和稳性是开发深海风能的重要装备。

由于 Spar 风电平台吃水较深,在海流作用下会导致其后方产生交替脱落的旋涡,从而形成顺流向和横流向的脉动压力,使平台产生大幅的水平运动,称之为涡激运动(Vortex-Induced Motion, VIM)。Spar 风电平台一般为无侧板单立柱平台,该平台形式更易发生大幅涡激运动。Hywind Scotland Spar 型 6MW 风电平台是立柱直径 14.4 m、吃水 78 m 的无侧板单立柱 Spar 风电平台,该类平台在实际运行中易监测到显著的大幅涡激运动^[1]。涡激运动对系泊系统的疲劳带来挑战,需对其运动现象及规律进行深入研究。

目前,海洋平台涡激运动的主要研究方法有实尺度观测、模型试验和计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值计算等,其中计算流体动力学数值计算方法具有可操作性强、易重复和耗费少等优点,已逐步成为涡激运动的主要研究方法。2005 年 Thiagarajan 等^[2]采用计算流体动力学数值计算方法计算对比了有、无侧板圆柱的涡激运动频域特点;2014 年苏云龙^[3]对单根圆柱固定绕流进行了计算流体动力学数值计算,通过流场分析研究了旋涡脱落机理,但未考虑流固耦合;2015 年赵伟文和万德成^[4]用计算流体动力学数值计算方法计算了 U_r 为 5~9 时有侧板 Spar 平台的涡激运动响应,并与模型试验进行了比较;2016 年 Duan 等^[5]采用模型试验的方法研究了 OC3 Spar 型浮式风机的涡激运动特性,发现并分析了平台横荡、纵荡锁频现象;2018 年翟佳伟等^[6]研究了风浪流联合作用下 Spar 基础的运动特性,其涡激力由二维圆柱绕流计算流体动力学数值计算模型计算得到;2019 年何佳伟等^[7]计算模型尺度下的有、无侧板 Spar 平

收稿日期:2021-06-08

资助项目:国家自然科学基金项目——深水浮式结构物与内孤立波流固耦合作用及载荷相应机理研究(51879287)和深海浮体/系缆/立管运动的耦合动力分析方法(51490675)

作者简介:宋佳奇(1996—),男,硕士研究生,主要从事浮式平台涡激运动方面研究. E-mail: oucsongjiaqi@163.com

* **通信作者:**王俊荣(1982—),男,副教授,博士,主要从事浮式结构物水动力性能方面研究. E-mail: wangjunrong@ouc.edu.cn

(王佳实 编辑)

台的涡激运动过程,重点关注了螺旋侧板的减涡效果。针对无螺旋侧板 Spar 风电平台,获取平台涡激运动响应幅值与来流约化速度关系曲线,是分析平台涡激运动特性和评估系泊系统疲劳的基础。

本文建立了无侧板单立柱 Spar 风电平台二维计算流体动力学数值计算模型,开展平台在不同流速下的涡激运动数值计算,探究 Re 不相似对平台涡激运动的影响,为平台相关设计分析与试验提供参考。

1 数值方法

1.1 控制方程

涡激运动是非定常、黏性流问题,本文假设流体为不可压缩牛顿流体,采用雷诺平均法(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS)处理纳维-斯托克斯方程(N-S 方程),得到的控制方程包括:

1) 连续方程

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

2) 动量方程

$$\rho \frac{D\bar{u}_i}{Dt} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + \overline{\rho f_j}. \quad (2)$$

式(1)~式(2)中: x_i 和 x_j 为位移张量; $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 为流体速度张量的时间均值; u'_i 和 u'_j 为流体速度张量的时间脉动值; ρ 为流体密度; t 为时间; f_j 为流体元单位质量的体积力张量; $\bar{p}$ 为压力的时间平均值; μ 为流体动力黏度; $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 为雷诺应力张量,记为 τ_{ij} ,对应 3 个不同的正应力和 3 个不同的切应力。式(1)和式(2)共 4 个偏微分方程、10 个未知变量,为使方程闭合需要对雷诺应力 τ_{ij} 作相应假设,建立应力的表达式或引入新的湍流模型方程。

1.2 湍流模型

本文所使用 SST $k-\omega$ 湍流模型是一种雷诺平均法,最早由 Menter 等^[8-9]提出。该模型通过剪切应力输运(Shear Stress Transport, SST)过程将 $k-\omega$ 模型和 $k-\epsilon$ 模型两端流模型结合,在近壁面区域采用边界条件处理能力良好的 $k-\omega$ 模型,在远场采用自由剪切流处理较好的 $k-\epsilon$ 模型。SST $k-\omega$ 模型充分结合 $k-\omega$ 模型 $k-\epsilon$ 模型的优点,提高了计算精度。模型中湍动能(k)和特定湍流耗散率(ω)方程分别为^[8]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \tilde{P} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) CD_{k\omega}, \quad (4)$$

式中: μ_t 为湍流涡动力黏性; ν_t 为湍流涡运动黏性; P 为湍流生成项; $\tilde{P}$ 为进行限制后的生成项; β^* 为修正系数; β, γ, σ_k 和 σ_ω 均为封闭参数; F_1 为混合函数,用以在近壁处激活标准 $k-\omega$ 模型,在远场处激活 $k-\epsilon$ 模型; $CD_{k\omega}$ (cross-diffusion) 为交叉扩散项。式(3)和式(4)右侧前 3 项分别为生成项、耗散项和扩散项,式(4)右侧第 4 项为交叉扩散项。其中:

$$\tilde{P} = \min(P, 10\beta^* \rho k \omega), \quad (5)$$

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (7)$$

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

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega_y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{kw}^* y^2} \right] \right\}^4 \right\}, \quad (9)$$

$$CD_{kw}^* = \max(CD_{kw}, 10^{-20}), \quad (10)$$

$$CD_{kw} = \frac{2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (11)$$

$$\mu_1 = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad (12)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega_y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\}, \quad (13)$$

式中: S_{ij} 为平均应力张量; δ_{ij} 为克罗内克函数; CD_{kw}^* 为修正后的交叉扩散项; Ω 为旋度幅度; y 为距最近壁面距离; a_1 为修正系数; F_2 为混合函数; 封闭参数 β 、 γ 、 σ_k 和 σ_ω 在近壁处和远场处具有不同值, 下标 1 为近壁处参数值, 下标 2 为远场处参数值, 其中各参数值为 $\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$ 、 $\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$ 、 $\sigma_{k1} = 0.85$ 、 $\sigma_{\omega 1} = 0.5$ 、 $\beta_1 = 0.075$ 、 $\sigma_{k2} = 1.0$ 、 $\sigma_{\omega 2} = 0.856$ 、 $\beta_2 = 0.028$ 、 $\beta^* = 0.09$ 、 $\kappa = 0.41$ 、 $a_1 = 0.31$ 。 β 、 β^* 、 γ 、 σ_k 和 σ_ω 在距离面不同位置具有不同的值, 须加权平均得到式(3)和式(4)中的值, 对任意参数 α , 有:

$$\alpha = F_1 \alpha_1 + (1 - F_1) \alpha_2. \quad (14)$$

1.3 流固耦合

计算物体流固耦合运动需要采用动网格技术, 对于平台大幅度往复运动的问题, 重叠网格方法可实现多个相互独立网格之间产生无约束相对运动, 网格不变形, 可稳定地进行流固耦合计算。通过自编程序计算物体运动的动力积分, 实现对重叠网格的运动控制和流固耦合。具体做法是: 在每一时间步内, 将计算流体动力学数值计算求解得到的流体激励代入平台运动微分方程求解物体运动响应, 然后对重叠网格位置及流场进行更新, 完成该时间步的流固耦合, 流程见图 1。

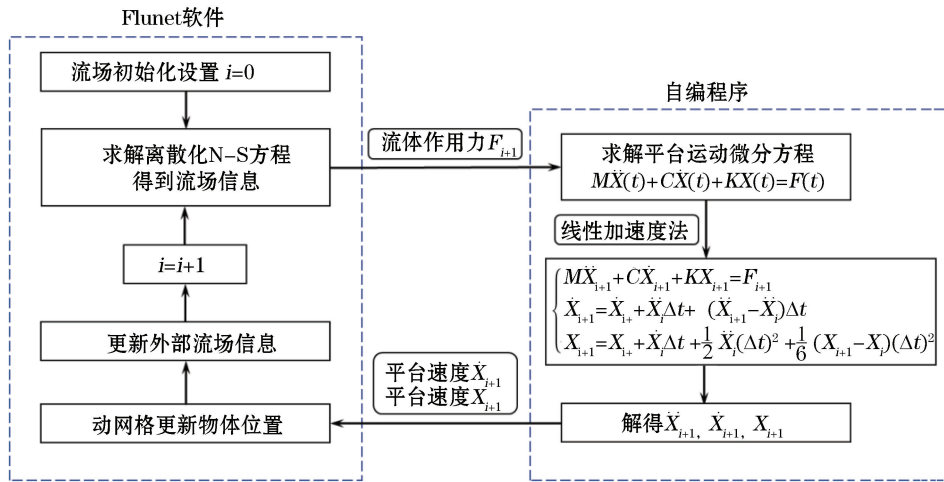


图 1 涡激运动流固耦合求解流程

Fig.1 Flow chart of solving the VIM fluid-solid coupling

1.4 涡激运动相关特征参数

本文重点关注如下浮式平台涡激运动无因次参数:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}, \quad (15)$$

$$St = \frac{f_v D}{U}, \quad (16)$$

$$U_r = \frac{U}{f_n D}, \quad (17)$$

$$A/D = \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{2D}, \quad (18)$$

$$C_L = \frac{F_Y}{\frac{1}{2} \rho S_L U^2}, \quad (19)$$

$$C_D = \frac{F_X}{\frac{1}{2} \rho S_D U^2}, \quad (20)$$

式(15)~式(20)中: St 为斯特劳哈尔数; A/D 为无量纲振幅, 其中 D 为结构特征长度(立柱直径), A 为平台运动幅值; C_L 为升力系数, C_D 为阻力系数, 采用阻力系数均值($\bar{C}_D$)和升力系数标准差(C_L')来表征平台水动力系数; ρ 为流体密度; U 为来流速度; f_v 为平台涡脱频率; f_n 为平台静水横荡频率; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为平台顺流方向偏移最大值和最小值; F_Y 和 F_X 分别为水动力在横流向和顺流向的分量; S_L 和 S_D 分别为浸没部分向升力和阻力方向的投影长度。

2 计算模型及工况

2.1 平台模型

本文重点研究 Spar 风电平台在海流作用下的涡激运动响应特征, 不考虑空气引起的涡激运动。实际尺度下, Spar 风电平台立柱直径为 10 m, 吃水 120 m, 质量 8 450 t。因涡激运动响应主要表现在水平面内运动, 立柱截面不变, 兼顾计算效率问题, 故采用平台二维涡激运动模型进行涡激运动计算。在计算流体动力学数值计算时采用 1:50 的缩尺比, 通过在计算流体动力学数值计算中定义流体黏度, 可满足雷诺数 Re 相似准则。

2.2 系泊系统

平台模型采用等效线性水平系泊提供回复力, 系泊系统由 4 根线性弹簧组成, 布置方式如图 2 所示, 平台立柱中心为坐标系原点, 每根弹簧与坐标轴的夹角为 45° , 平台横荡、纵荡固有周期相等, 实际尺度下, 系泊刚度为 2×10^4 N/m, 预张力为 1.5×10^6 N; 系泊系统整体的阻尼比为 0.06。

2.3 计算区域、边界条件与网格划分

计算区域分为背景网格和前景网格两部分(图 3), 背景网格为矩形区域, 以平台立柱直径 D 为基准, 矩形长 $36D$, 宽 $16D$; 前景网格为正方形区域, 边长 $7D$ 。为保证有足够空间使流场中旋涡充分发展, 背景网格中平台设置在靠近流体入口的一侧, 平台中心距左侧流体入口处 $8D$ 。

计算区域边界条件设置左侧为速度入口边界; 右侧为压力出口边界, 给定出口静压力 $p=0$, 对流动中的其他物理量均由流场内部值外差得到; 上下边界设置为自由滑移壁面; 平台立柱表面为无滑移壁面边界, 边

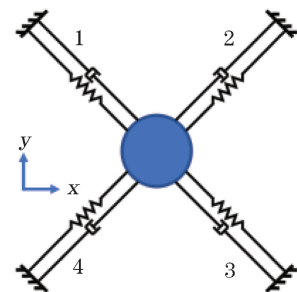


图 2 平台系泊方式示意图

Fig.2 Sketch map of the mooring mode of the platform

界上流体速度与壁面速度相同;前景网格边界设置为重叠网格边界。

对于湍流模型参数, k 和 ω 的初始流场和入口边界条件可以通过经验公式计算得到^[9], 即

$$k = \frac{3}{2}(U \cdot I)^2, \quad (21)$$

$$\omega = \frac{k}{\nu} \left(\frac{\nu_t}{\nu} \right)^{-1}, \quad (22)$$

式中: I 为湍流强度, ν_t/ν 为湍流黏度与层流黏度之比。在无滑移壁面边界处, k 和 ω 的法向梯度为 0, $k=0$, $\omega_{\text{wall}} = 10 \times 6\nu/(\beta_1 y_1^2)$, 其中 y_1 为壁面第一层网格单元中心到壁面距离。

为研究网格收敛性, 选取 3 种不同密度网格进行网格测试, 网格设置见表 1 所示。当 $Re = 1.42 \times 10^4$ 时, 计算 3 套网格的 $\bar{C}_D$ 和 St , 在保证计算结果稳定的前提下, 时间步长取 $\Delta t = 0.02$ s, 结果如表 1 所示。网格 2 与网格 3 计算结果接近, 继续加密网格对精度提高的效果有限, 故采用网格 2 进行后续数值计算, 网格划分如图 4 所示。

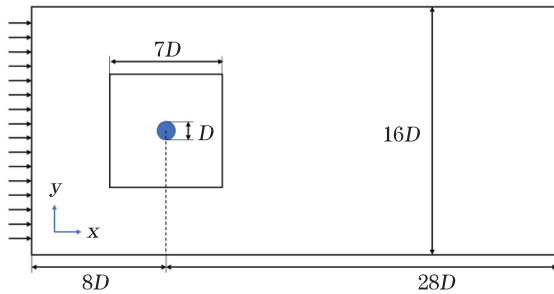


图 3 计算区域几何简图

Fig.3 Geometry diagram of the computational domain

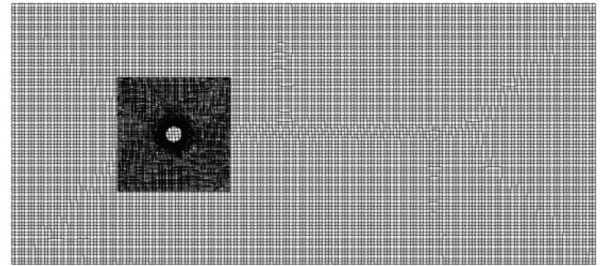


图 4 计算区域整体网格划分

Fig.4 Grid division of the entire computational domain

表 1 不同网格计算结果

Table 1 Results calculated based on the different sets of grids

网格编号	周向单元数	总单元数	阻力系数均值 $\bar{C}_D$	斯特劳哈尔数 St
网格 1	160	2.31 万	1.561	0.221
网格 2	320	2.92 万	1.523	0.232
网格 3	400	3.26 万	1.518	0.234

注:周向单元数代表网格模型中平台边界处的网格数量;总单元数代表前景网格单元数与背景网格单元数之和。

3 计算结果与分析

3.1 固定绕流计算

为了验证数值计算方法的可靠性, 首先对平台固定绕流进行数值计算研究, 本文选取 4 个工况, 对平台受力计算结果进行统计分析, 工况设置及统计各工况结果所得的 St 及 $\bar{C}_D$ 如表 2。将本文计算所得的 St 同 Blevins^[10] 总结的 $St-Re$ 关系曲线、苏云龙^[3] 数值计算的 St 结果对比(图 5), 本文及苏云龙计算得到的 St 均略高于 Blevins 所得 $St-Re$ 关系曲线; 将本文计算所得的 $\bar{C}_D$ 同 Schlichting^[11] 所得 $\bar{C}_D-Re$ 关系曲线、苏云龙^[3] 数值计算的 $\bar{C}_D$ 结果对比(图 6), 其数值接近 Schlichting 所得 $\bar{C}_D-Re$ 关系曲线。本文数值模型计算结果处于合理范围。

表 2 平台绕流工况及统计结果

Table 2 Conditions and statistics of the flow around the Spar

工况编号	流体动力黏度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	模型流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 Re	斯特劳哈尔数 St	阻力系数均值 $\overline{C_D}$
1	2.837×10^{-6}	0.069 3	5.01×10^6	0.285	0.522
2	2.837×10^{-6}	0.121 3	8.77×10^6	0.304	0.466
3	1.003×10^{-3}	0.069 3	1.42×10^4	0.232	1.523
4	1.003×10^{-3}	0.121 3	2.48×10^4	0.239	1.293

注:模型流速代表数值模型水槽中流体的流速。

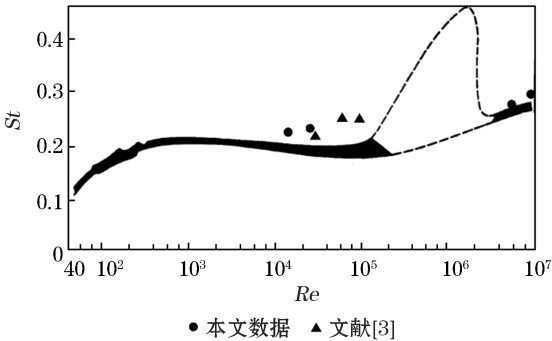


图 5 斯特劳哈尔数与雷诺数的关系

Fig.5 Relationship between the Strouhal number and the Reynolds number

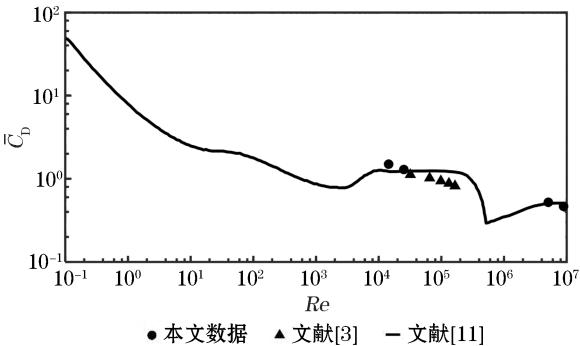


图 6 阻力系数均值与雷诺数的关系

Fig.6 Relationship between the mean of drag coefficient and the Reynolds number

3.2 涡激运动计算

本文探究平台在 $U_r=2\sim 14$ 范围内的涡激运动规律,计算模型与原型满足 Re 相似准则,流体动力黏度 $\mu=2.837 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,此时平台横荡和纵荡的固有频率 $f_n=0.086 \text{ Hz}$,称该平台系统为系统 1,具体工况设置如表 3 所示。

表 3 系统 1 涡激运动计算工况

Table 3 Conditions for VIM calculation of System 1

约化速度 U_r	雷诺数 Re	模型流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	实际流速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	约化速度 U_r	雷诺数 Re	模型流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	实际流速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
2.0	2.54×10^6	0.035 1	0.248 0	3.0	3.81×10^6	0.052 6	0.372 0
3.5	4.45×10^6	0.061 4	0.434 0	4.0	5.08×10^6	0.070 2	0.496 0
4.5	5.72×10^6	0.078 9	0.558 0	5.0	6.36×10^6	0.087 7	0.620 1
6.0	7.63×10^6	0.105 2	0.744 1	7.0	8.90×10^6	0.122 8	0.868 1
8.0	1.02×10^7	0.140 3	0.992 1	9.0	1.14×10^7	0.157 8	1.116 1
10.0	1.27×10^7	0.175 4	1.240 1	12.0	1.53×10^7	0.210 5	1.488 1
14.0	1.78×10^7	0.245 5	1.736 2				

注:实际流速代表实际工程环境中流体的流速。

图 7 为各工况平台纵荡、横荡运动时历曲线及平台运动轨迹图。对比图 7 中不同 U_r 下平台的运动轨迹,得到平台运动的变化特点和规律: $U_r=2$ 时,平台运动轨迹呈“8”字形,但幅值较小; $U_r=3$ 时,运动轨迹开始发散; $U_r=4$ 时,平台运动轨迹总体呈现出“C”字形的运动轨迹,横荡、纵荡幅值均较大; $U_r=7$ 时,平台运动轨迹变为狭长的“8”字形,横荡幅值较大,纵荡幅值较小; $U_r=10$ 时,平台运动轨迹开始发散,运动轨迹变为在一定范围内的往复运动; $U_r>10$ 时,平台运动范围大幅缩小,横荡、纵荡

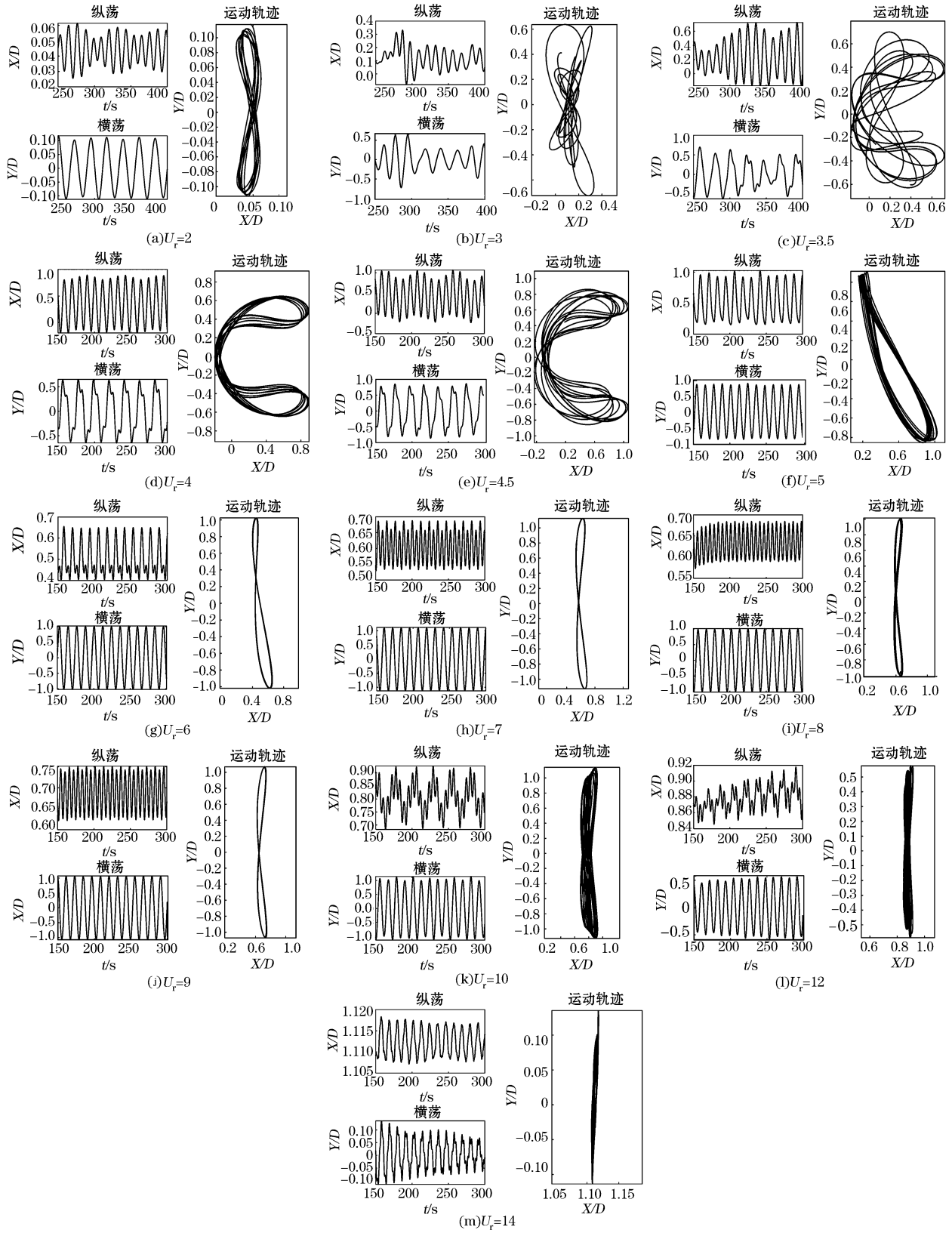


图 7 不同约化速度下纵荡、横荡运动时历曲线及运动轨迹

Fig.7 Time history and trajectory of the surge and sway motions at different reduced velocities

幅值均明显减小。

通过对平台 C_L 时历曲线做傅里叶变换,得到各工况下旋涡脱落频率(f_v)。图 8 为 Spar 风电平台不同 U_r 下的横荡频率(f_{sway})、涡激运动涡脱频率(f_{v-VIM})和根据 Blevins^[10] 总结的 St 计算得到的固定绕流涡脱频率($f_{v-Blevins}$)对比图。由图 8 可见,在 $U_r = 3.5 \sim 10$ 范围内, f_{v-VIM} 与 f_{sway} 几乎一致,且与 $f_{v-Blevins}$ 相差较大。 f_{v-VIM} 出现了 2 次频率锁定现象:在 $U_r = 3.5 \sim 4.5$ 时,平台发生了纵荡共振,此时为纵荡锁频, f_{v-VIM} 为 0.048 Hz,纵向激励力振荡频率与平台纵荡固有频率相近;在 $U_r = 5 \sim 10$ 时,平台发生了横荡共振,此时为横荡锁频, f_{v-VIM} 为 0.085 Hz,横向激励力振荡频率与平台横荡固有频率相近。 $U_r = 10$ 时 f_{v-VIM} 和 f_{sway} 开始出现差别, $U_r > 10$ 时 f_{v-VIM} 明显高于 f_{sway} ,接近于 $f_{v-Blevins}$ 。

对各工况结果进行统计分析,得到图 9 所示的不同 U_r 下平台纵荡和横荡运动特征参数对比。图 9 中 X 和 Y 为平台纵荡、横荡偏移平均值,平台纵荡、横荡运动幅值 A_X 和 A_Y 可由最大值减去均值近似计算得到。结合图 8 和图 9 可知:在纵荡锁频时 A_X 和 $X_{\max}$ 显著变大, $U_r = 4.5$ 时 A_X 达到最大;在横荡锁频时 $A_Y/D > 1$ 。锁频现象显著影响平台涡激运动幅值,平台设计时应考虑纵荡锁频对平台运动响应的影响。

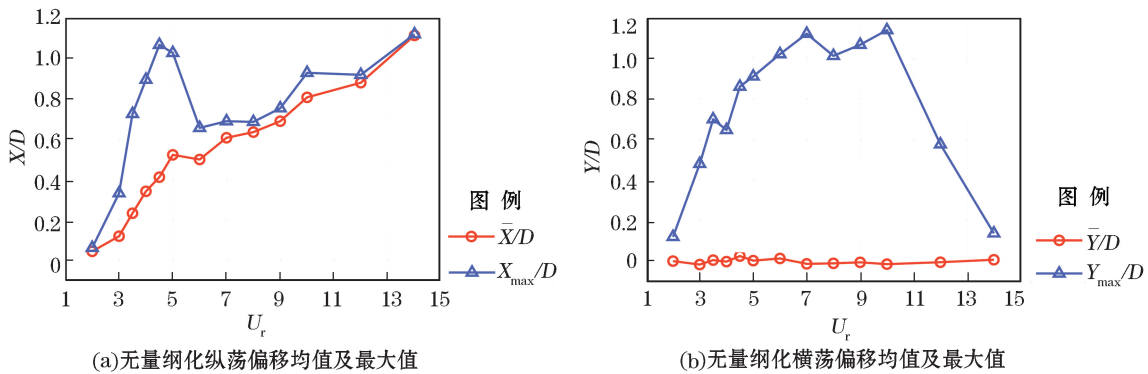


图 9 无量纲化平台纵荡、横荡运动的均值和最大值

Fig.9 Nondimensionalized mean and maximum of the surge and sway motions at different reduced velocities

3.3 不满足雷诺相似准则的影响

物理水池试验无法满足 Re 相似准则,实验结果与原型运动结果会产生差异,本节通过计算流体动力学数值计算方法探究不满足雷诺相似准则对涡激运动计算结果的影响。设置计算模型的流体动力黏度为 $1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,平台系统横荡、纵荡固有频率为 0.084 Hz,称此平台为系统 2(表 4)。

图 10 为 2 个系统计算的平台 $\bar{C}_D$ 和 C'_L 的对比,系统 2 的 $\bar{C}_D$ 和 C'_L 均大于系统 1。图 11 为相同 U_r 下 2 个系统平台的运动轨迹对比,系统 2 平台轨迹在 4 个工况下均位于系统 1 的右侧,其纵荡平均值 $\bar{X}$ 大于系统 1。由图 11c 和图 11d 可见,系统 1 从 $U_r = 10$ 时开始解锁,而系统 2 在 $U_r > 12$ 时流速逐渐解锁。分析系统 1 和系统 2 计算所得运动幅值和解锁时的 U_r 不同的原因:系统 2 的 Re 不相似,高估了黏性力,故 C_D 偏

表 4 系统 2 工况设置表

Table 4 Condition settings for VIM calculation of System 2

工况编号	约化速度 U_r	模型流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	雷诺数 Re
1	4	0.067 6	1.35×10^4
2	7	0.118 2	2.36×10^4
3	10	0.168 9	3.37×10^4
4	12	0.202 7	4.04×10^4

大,平台纵荡偏大;系统 2 中,平台涡激运动的黏性阻尼力和黏性激励力增大,在横荡锁频时,阻尼力增大会使横流向的响应幅值减小,而激励力增大会使顺流向的响应幅值增大,响应幅值的变化与平台运动状态相关;系统 2 的 Re 为 10^4 数量级,根据 $Re-St$ 关系图(图 5)可知,系统 2 的 St 小于系统 1,故系统 2 的解锁时的 U_r 大于系统 1。

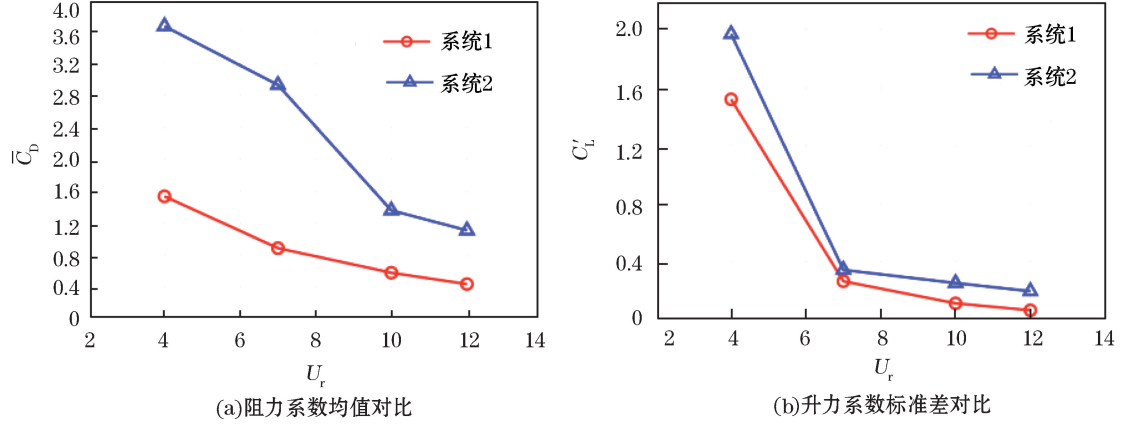


图 10 2 个系统阻力系数均值和升力系数标准差对比

Fig.10 Comparison of $\bar{C}_D$ and C'_L between the two systems

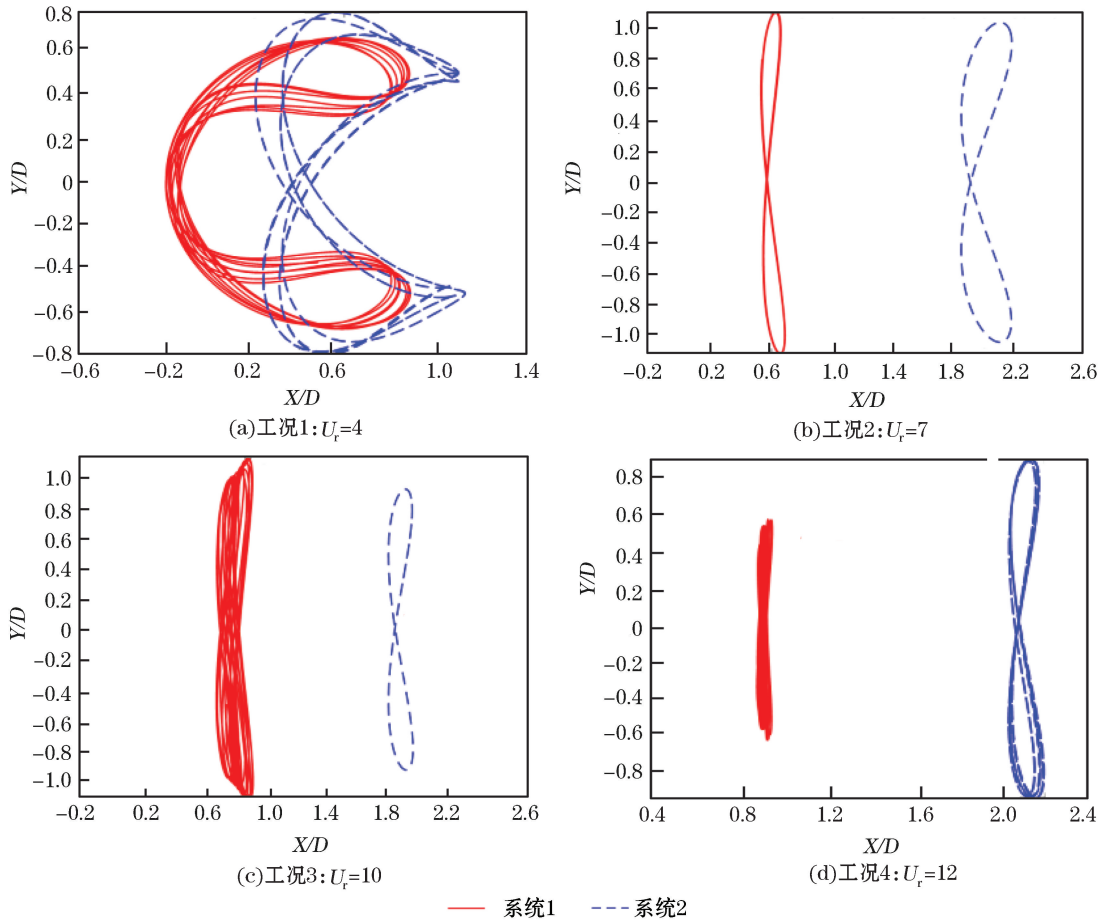


图 11 相同约化速度下系统 1 和系统 2 平台运动轨迹对比

Fig.11 Comparison of Spar motion trajectory between System 1 and System 2 at the same reduced velocity

4 结 论

本文采用计算流体动力学数值计算方法对一无侧板单立柱 Spar 风电平台涡激运动现象进行数值计算,研究平台在不同 U_r 的涡激运动特征。计算采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,通过自编动力积分程序和重叠网格实现涡激运动的实时流固耦合,对平台在 $U_r=2\sim 14$ 的涡激运动响应进行了计算,分析了涡激运动模式随 U_r 变化的规律,定性分析了不满足雷诺相似准则对涡激运动计算的影响。得出以下结论:

1) 平台在不同 U_r 下会经历 2 次锁频,在 $U_r=3.5\sim 4.5$ 时出现运动轨迹呈“C”字形的纵荡锁频,在 $U_r=5\sim 10$ 出现运动轨迹呈“8”字形的横荡锁频。

2) 获取了平台纵荡和横荡无量纲振幅曲线,发现锁频现象对涡激运动响应幅值影响明显。

3) 物理模型试验因无法满足 Re 相似,高估了黏性力,在横荡锁频时高估了顺流向的运动幅值,低估了横流向的涡激运动幅值。

参考文献(References):

- [1] HERBJØRN H. Offshore vind-Konstruksjonsutfordringer med flytende vind-Hywind[EB/OL]. [2021-06-08]. <https://www.ptil.no/contentassets/2f064a1bf63b4d7d99a69696fb068b90/offshore-vind---konstruksjonsutfordringer-med-flytende-vind---hywind---herbjorn-haslum-equinor.pdf>
- [2] THIAGARAJAN K P, CONSTANTINIDES Y, FINN L. CFD analysis of vortex-induced motions of bare and straked cylinders in currents[C]// American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Greece: American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [3] 苏云龙. 海流作用下多立柱式 Spar 平台绕流流场与涡激运动特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. SU Y L. Research on the flow field and vortex-induced motions of multi-column Spar platform subjected to ocean current [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [4] 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 A 辑, 2015, 30(1): 40-46. ZHAO W W, WAN D C. Numerical investigation of vortex-induced motions of Spar platform based on large eddy simulation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(1): 40-46.
- [5] DUAN F, HU Z Q, WANG J. Investigation of the VIMs of a spar-type FOWT using a model test method[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2016, 8(6): 74-85.
- [6] 翟佳伟, 唐友刚, 李焱, 等. 风浪流中涡激共振对 Spar 型浮式风机运动响应的影响[J]. 海洋工程, 2018, 36(4): 39-49. ZHAI J W, TANG Y G, LI Y, et al. Effect of vortex-induced resonance on motion response of Spar-type FOWT under wind current and wave[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(4): 39-49.
- [7] 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 J W, ZHAO W W, WAN D C. Numerical simulation of vertex induced motion for Spar platform with helical strakes[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(4): 74-84.
- [8] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Heat and Mass Transfer, 2003(4): 625-632.
- [9] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. 1994, 32(8): 1598-1605.
- [10] BLEVINS R D. Flow Induced Vibration[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1977.
- [11] SCHLICHTING H. Boundary-layer theory[M]. New York: McGraw-hill Book Company, 1979.

Characteristics of Vortex-Induced Motions of Spar-Type Floating Wind Turbine

SONG Jia-qi¹, WANG Jun-rong^{1,2}, WANG De-zhi¹, KANG Xin-long¹

(1. *College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Shandong Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China*)

Abstract: The characteristics of vortex-induced motions (VIM) of a Spar-type wind turbine without helical strakes are studied under the conditions of different reduced velocities (U_r). Based on the computation of fluid dynamics, the vortex shedding is simulated using the $k-\omega$ turbulent model of shear stress transport (SST), and the real-time flow-solid coupling of the vortex-induced motions is realized by self-compiled dynamic integration program and overlapping grid method. Through the calculation of Spar's VIM response at reduced velocity $U_r=2-14$, the change law of the VIM mode with reduced velocity are studied, and the effect of the dissatisfying of Reynolds number similarity of the physical model tests on the calculation results of VIM is analyzed qualitatively. The results show that the Spar-type wind turbine experiences a surge and a sway frequency lock-in at $U_r=3.5-4.5$ and $U_r=5-10$, respectively; and that the dissatisfying of Reynolds number similarity of the physical model tests overestimates the viscous force suffered by the Spar. The VIM characteristics of the Spar-type wind turbine obtained by the numerical calculations can provide a reference for the design and test of the Spar-type floating wind turbine.

Key words: Spar-type wind turbine; vortex-induced motion; flow-solid coupling; floating wind turbine

Received: June 8, 2021