

螺旋侧板截面形状对 Spar 平台涡激运动的影响研究

张楠¹, 李春^{1,2}, 丁勤卫¹, 郝文星¹, 王东华¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要: 处于深水中的 Spar 平台两侧不断产生周期性漩涡脱落, 极易诱发涡激运动, 缩短平台疲劳寿命。为探究不同截面形状螺旋侧板对漂浮式风力机 Spar 平台涡激运动的影响, 采用大涡模拟 (LES) 方法, 对亚临界雷诺数流动状态下附加不同截面形状螺旋侧板的平台进行研究, 并与光滑平台进行对比, 分析其水动力系数及尾涡发放特点。研究表明: 螺旋侧板在有效抑制平台升力系数的同时, 还会增加阻力系数, 圆形截面侧板对平台升力系数的降幅最大, 阻力系数增幅最小; 螺旋侧板的存在使漩涡脱落频率整体减小, 从单一主频发放变为主频和次频发放; 圆形截面侧板的漩涡脱落点距离平台最远, 发放最为迟缓; 在研究范围内, 发现圆形截面侧板抑涡效果最佳。

关键词: Spar 平台; 涡激运动; 螺旋侧板; 截面形状; 大涡模拟

中图分类号: P756 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)03-0105-05

Study on the influence of section shape of helical strakes on the vortex – induced motions of Spar platform

ZHANG Nan¹, LI Chun^{1,2}, DING Qinwei¹, HAO Wenxing¹, WANG Donghua¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: Spar platforms in deep water on both sides suffer from a constant periodic vortex shedding, which will easily induce vortex – induced vibration and reduce the fatigue life. In order to study the influence of section shape of helical strakes on the vortex – induced motions of Spar platform, numerical analysis is carried out for the bare cylinder and Spar platform with different section shapes at Reynolds number $Re = 3900$ by large eddy simulation (LES), including hydrodynamic coefficient and wake flow field. Research shows that the helical strakes are effective in reducing lift coefficient, but will increase drag coefficient, and the circle section strakes are the most efficient which reduced lift coefficient by 94% and increase drag coefficient by 15%. The helical strakes reduce the overall frequency of the vortex shedding and the single frequency is replaced by major and minor frequencies. The circle section has the longest distance before the vortex shedding and has the lowest frequency; and the circle section has the best suppression effect within the range of the research.

Key words: Spar platform; vortex – induced motion; helical strakes; section shap; LES

近年来,随着全球风电产业的深入发展,海上风能的开发逐渐向资源更为丰富的深水海域发展。Spar 平台是一种漂浮式平台,更适应深水海洋工程的需求。Spar 平台主体为圆柱体,在来流作用下容易产生涡激运动,严重时将导致其结构及系泊系统的损坏^[1]。目前已有导流板、屏蔽装置和减震器等多种抑涡装置,但实际工程中最常用的是螺旋侧

板^[2-4]。螺旋侧板能够对经过平台主体的来流起到分流作用,通过控制分离位置来削弱旋涡强度,从而减少平台的涡激运动^[5]。国内外众多学者针对螺旋侧板的抑涡效果已开展了大量研究。

Simantiras 等^[6-8]通过实验和数值模拟验证了螺旋侧板抑制涡激运动的有效性。Baarholm 等^[9-14]探究了螺旋侧板片数、覆盖率、高度和导程

收稿日期:2017-02-14; 修回日期:2017-02-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51676131、51176129); 上海市科委项目(13DZ2260900)

作者简介:张楠(1992-),女,山东济南人,硕士研究生,研究方向:风力发电。

通讯作者:李春(1963-),男,北京人,教授,博士生导师,研究方向:风力利用、动力机械及工程。

等参数对抑涡效果的影响,确定最优参数组合。Roddi^{er}等^[15-16]研究了不同雷诺数范围内螺旋侧板的抑涡效果。文献^[17]研究了在相互干涉的柱群中,螺旋侧板对涡激运动的抑制效果。然而,现有研究中所涉及螺旋侧板形式单一,外齿截面通常为矩形或三角形^[18],鲜见有关其他截面形状的报道。因此,研究不同截面形状螺旋侧板对抑涡效果的影响具有重要意义。

本文采用 LES 方法,首先通过光滑圆柱进行模型验证及网格无关性检验,进而通过对水动力系数、漩涡发放频率及尾涡形态的分析来研究不同截面形状螺旋侧板对涡激运动的影响,以期螺旋侧板在工程实践中的应用提供参考。

1 数值计算方法^[19]

1.1 控制方程

本文采用 LES 方法进行数值模拟,其核心思想主要通过滤波方法将尾流中的漩涡分解成大尺度涡(可解)和小尺度涡(不可解,用子格模型模拟),分别进行数值求解,从而获得雷诺时均方法不可解决的非稳态、非平衡过程中出现的大尺度效应及逆序结构,同时又能减小模拟小尺度湍流的巨大开支^[20]。任意流动变量 f 可写为:

$$f = \bar{f} + f' \quad (1)$$

$$\bar{f}(x_i, t) = \int_{vol} G(x_i - x'_i) f(x'_i, t) dx'_i \quad (2)$$

式中: \bar{f} 为大尺度量,用体平均定义; f' 为小尺度量,也称 f 的亚格子分量; $G(x_i - x'_i)$ 为高斯滤波方程。

不可压缩黏性流体的控制方程经滤波后为:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

$$\partial \rho \bar{u}_i / \partial t + \partial (\rho \overline{u_i u_j}) / \partial x_j = - \partial P / \partial x_i + \mu \partial^2 \bar{u}_i / \partial x_j \partial x_j + \partial \tau_{ij} / \partial x_j \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = \nu_{SGS} (\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i) \quad (5)$$

式中: \bar{u}, \bar{v} 为经滤波后沿 x 轴、 y 轴的速度, m/s; P 为压强, Pa; τ_{ij} 为未求解的亚格子湍流应力, Pa; ν_{SGS} 为亚格子涡黏系数。

1.2 计算模型

文献^[21]认为,3片侧板与4片侧板的抑涡效果相差不大,但比2片侧板抑涡效果好,故均采用3片侧板形式。文献^[3]指出目前 Spar 平台常用的螺旋侧板高度一般为 $5\% D \sim 15\% D$ (D 为圆柱体直径),本文中侧板高度均选 $15\% D$ 。文献^[22]的研究结果表明,侧板螺距比为5时抑涡效果最好,因此侧板螺距比均取5。本文选取不同截面形状的螺旋

侧板进行研究,分别为矩形、三角形和圆形,如图1所示。



图1 螺旋侧板的截面形状

研究表明^[23],为避免选取矩形流域时下游壁面边界及侧壁面边界对圆柱周围流场产生影响,下游壁面边界距圆柱中心距离需大于 $14.5 D$,侧壁距圆柱中心需大于 $8 D$,三维展向长度应大于 πD 。因此本文选取计算流域如图2,圆柱中心距流域上游 $10 D$,下游 $25 D$,距两侧壁面均为 $10 D$,展向长度即平台高度,为 $15 D$ 。

1.3 边界条件及参数设置

流域入口及侧面均设置为速度入口,来流方向为 x 轴正向;出口为压力出口,忽略纵向速度梯度;圆柱表面满足无滑移固壁条件。

湍流模型采用 LES 模型,压力-速度耦合采用 SIMPLEC 方法,时间离散方式采用二阶隐式,压力项离散格式采用二阶精度,动量方程的离散采用中心差分格式。

计算时间步长取 0.02 s,约为 $Re = 3\ 900$ 时圆柱绕流斯特劳哈周期的 $1/25$,即每个旋涡脱落周期内对流场进行25次采样,一般认为可满足计算精度要求,且计算效率较高。

2 网格划分与模型验证

利用 ICEM CFD 进行建模及网格划分。将全部流场划分为9个区域,对圆柱周围及尾流场区域内进行局部加密,所有区域均采用结构网格,如图3所示。由文献^[24]可知,圆柱近壁处第一层网格高度需满足 $y^+ \approx 1$,根据如下公式估算第一层网格控制点距壁面距离 Δy :

$$y^+ = 0.172 \Delta y / (D \cdot Re^{0.9}) \quad (6)$$

根据 $D = 0.02$ m, $Re = 3\ 900$,可得出近壁处第一层网格高度 $\Delta y = 6 \times 10^{-5}$ m。

表1为 $Re = 3\ 900$ 时光滑圆柱绕流的数值计算与实验结果。对比发现,本文计算值优于文献^[25]与^[26]计算值,与实验值^[27]最为接近,从而验证了本文中数值计算方法的准确性。

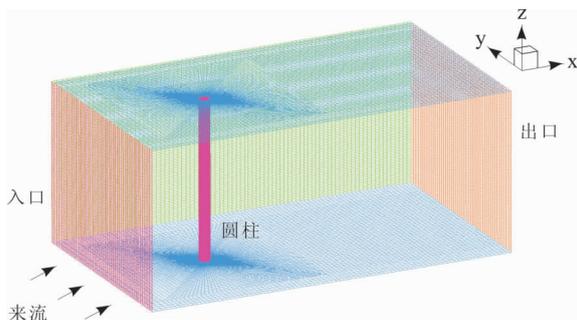
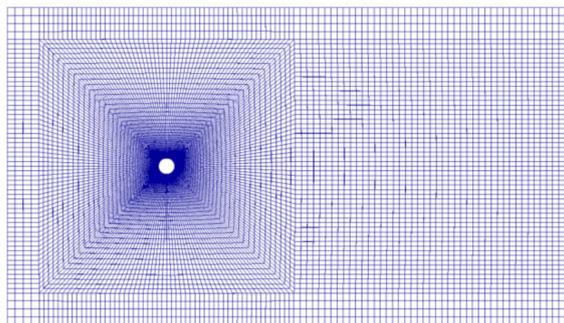
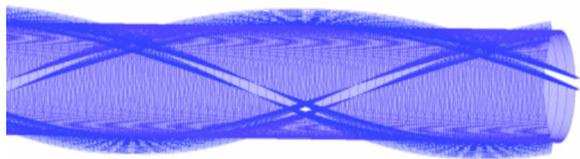


图2 计算流域



(a) 平面网格划分



(b) 附加螺旋侧板平台网格划分

图3 网格划分图

表1 光滑圆柱绕流结果校核

$Re = 3900$	平均阻力系数 C_d	St
文献[25](Num)	1.200	0.210
文献[26](Num)	1.210	0.200
文献[27](Num)	1.040	0.210
文献[27](Exp)	0.990 ± 0.050	0.215 ± 0.005
本文	1.040	0.210

对圆柱绕流进行数值模拟计算时,主要通过离散点采集数据信息,因此展向网格的划分对结果精确度影响较大。在网格无关性检验中重点对展向网格参数的疏密进行比较。

如表2所示,各算例沿展向划分网格数分别为80、100、120和140,将所得平均阻力系数 C_d 与实验值进行比较发现,算例3、4均满足精度要求。但从网格总数和计算时效来看,选取算例3作为最终计算模型。

表2 展向网格划分测试

算例	展向网格	单元数	计算时耗/h	平均阻力系数 C_d
1	80	1230968	9.2	1.112
2	100	1474868	10.7	1.109
3	120	1852388	12.5	1.040
4	140	2133484	13.8	1.038
实验值				0.990 ± 0.050

3 附加螺旋侧板平台结果分析

在亚临界雷诺数条件下,对附加不同截面形状螺旋侧板的平台进行数值模拟,残差值在 $T = 10$ s 后开始趋于稳定,升、阻力系数曲线进入周期性变化,因此取计算时长 $T = 30$ s,可真实反映其流动情况。

3.1 水动力系数分析

图4为光滑圆柱及附加不同截面形状螺旋侧板平台的水动力系数结果。

图4(a)为不同平台升力系数的标准差变化情况。标准差可反映升力系数的振荡幅度大小。由图4(a)可知,加装螺旋侧板之后,升力系数振荡幅值明显减小,其中圆形截面侧板的降幅高达94%,三角形次之,为93%,矩形最小,为92%。说明螺旋侧板可有效抑制平台的横向受力。

由图4(b)可知,加装螺旋侧板之后,阻力系数明显增加,矩形、三角形和圆形截面侧板的增幅分别为20%、25%和15%左右。这是由于侧板的存在增加了与流体接触面积,导致平台所受拖曳力增大。

综合水动力系数可知,加装圆形截面侧板时,升力系数减小幅度最大,且阻力系数增加幅度最小。

3.2 频谱分析

图5为升力系数的谱密度,对其分析可得到三维流动下不同截面形状侧板对尾涡脱落频率的影响。峰值代表旋涡以此频率从平台脱落。

由图5(a)可知,对于光滑圆柱,旋涡以2.1 Hz的单一主频脱落,说明其尾流区存在稳定的卡门涡街。

由图5(b)可知,加装螺旋侧板后,旋涡脱落频率由单一主频发放转变为一个主频和一个次频发放,且脱落频率整体减小。其中,矩形截面侧板的主频降为0.17 Hz,次频为1.24 Hz,并出现较多不明显的小峰值;三角形截面侧板的主频为0.21 Hz,次频为1.34 Hz,出现多个较明显的峰值;圆形截面侧板的主频跃迁至0.37 Hz,次频为1.30 Hz,但在0~1.5 Hz区间内连续出现多个峰值,说明圆形截面侧

板的存在彻底破坏了流场尾涡的单一发放频率,涡激运动抑制起到明显效果。

3.3 尾涡分析

图6为沿z轴方向的涡量等值面图。由图6可知,当流体流过平台时在其后方产生方向相反的涡对,从平台上脱落并向后运动,在黏性的作用下能量耗散直至旋涡消失。

由图6(a)可知,光滑圆柱在整个流场中呈现出较为规则的旋涡脱落形态,边界层分离点约在圆柱正上方。

由图6(b)、(c)、(d)可知,加装螺旋侧板之后,分离点转移到侧板顶端,使旋涡沿侧板进行分离,涡旋的形态也随之发生改变,由比较规则的对称旋涡向不规则的旋涡过渡。这在一定程度上避免了“锁

定”现象的发生,减小了涡激运动对平台的影响。同时,旋涡脱落的位置向后移动,脱落频率降低。其中,当侧板截面形状为圆形时,旋涡脱落点距离平台最远,发放最为迟缓,说明圆形截面侧板对尾流场影响最大,可有效抑制旋涡脱落。

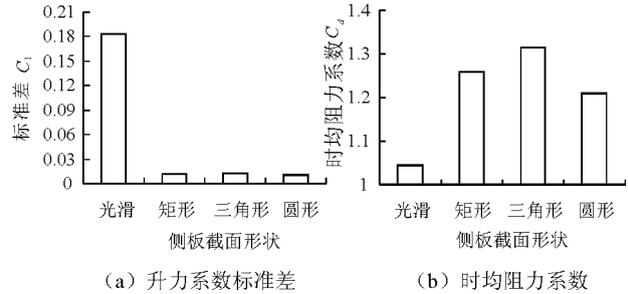


图4 水动力系数

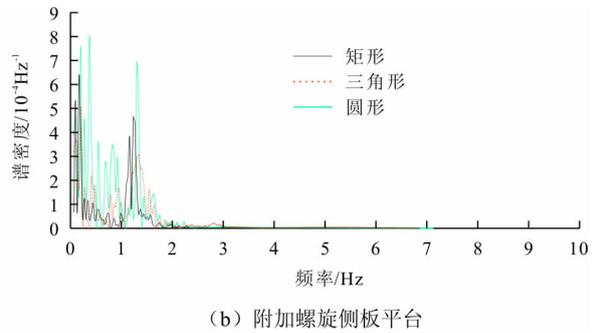
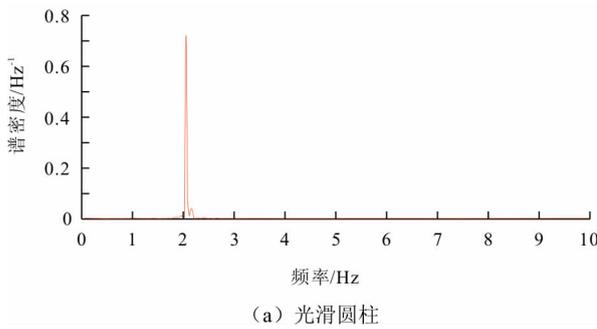


图5 升力系数谱密度

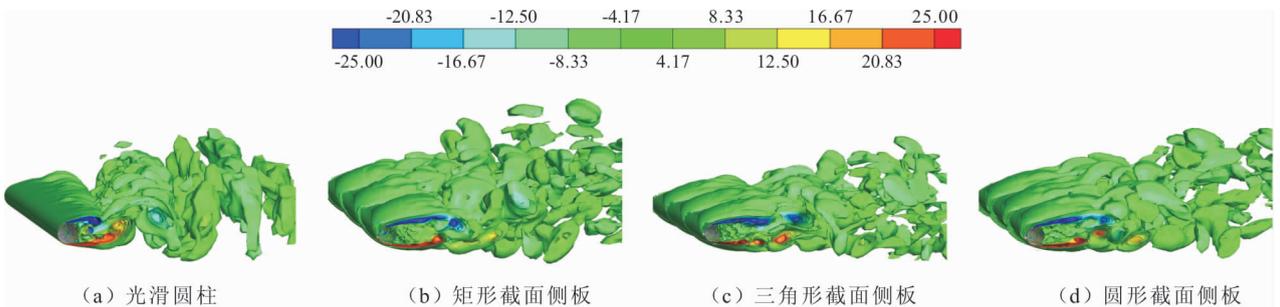


图6 尾流场涡量等值面图

4 结论

本文基于CFD方法,利用LES模拟对亚临界雷诺数下光滑圆柱及附加不同截面形状的螺旋侧板平台进行了研究,比较不同截面形状对抑涡效率的影响,得出结论:

(1) 加装螺旋侧板后,平台升力系数明显减小,但阻力系数略有增加,其中,圆形截面侧板平台升力系数降幅最大,为94%,且阻力系数增幅最小,为15%;

(2) 螺旋侧板的存在使旋涡脱落频率整体减小,从单一主频发放变为主频和次频发放,并且圆形截面侧板在0~1.5 Hz区间内连续出现多个峰值,说明旋涡发放频率受到明显影响;

(3) 螺旋侧板可改变旋涡分离点位置和形态,同时使旋涡脱落点后移,抑制了旋涡的发放,一定程度上避免了“锁定”现象的发生,其中圆形截面侧板的旋涡脱落点距离平台最远,发放最为迟缓;

(4) 在研究范围内,从平台所受水动力、旋涡发放频率和旋涡脱落点位置等综合考虑,发现圆形截面螺旋侧板的抑涡效果最佳。

参考文献:

- [1] 杨烁, 缪泉明, 匡晓峰. Spar 平台螺旋侧板绕流场的 CFD 分析[C] // 全国水动力学学术会议暨两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会, 2008.
- [2] Mikta N, Bando A, Otsuka K. Experimental study of a flexible riser covered with helical strakes[C] // The Thirteenth International Offshore And Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003.
- [3] Huang S. VIV suppression of a two-degree-of-freedom circular cylinder and drag reduction of a fixed circular cylinder by the use of helical grooves[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27(7): 1124-1133.
- [4] Blumberg M, Tellier E, Deka D, et al. Experimental evaluation of vortex induced vibration response of straked pipes in Tandem Arrangements[C] // ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, 2012: 873-881.
- [5] 魏泽, 吴乘胜, 倪阳. 基于正交设计和 CFD 模拟的 Spar 平台螺旋侧板水动力优化设计研究[J]. 船舶力学, 2013(10): 1133-1139.
- [6] Simantiras P, Willis N. Investigation on vortex induced oscillations and helical strakes effectiveness at very high incidence angles[C] // The Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest France, 1999.
- [7] Irani M, Finn L. Improved strake design for vortex induced motions of spar platforms[C] // ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [8] Thiagarajan K P, Constantinides Y. CFD analysis of vortex-induced motions of bare and straked cylinders in currents[J]. American Society of Mechanical Engineers, 2005: 903-908.
- [9] Baarholm R, Lie H. Lie. Systematic parametric investigation of the efficiency of helical strakes[J]. Proceedings of the Deep Offshore Technology, 2006(1): 1-9.
- [10] Trim A D, Braaten H, Lie H, et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers[J]. Journal of fluids and structures, 2005, 21(3): 335-361.
- [11] Korkischko I, Meneghini J R. Experimental investigation of flow-induced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes[J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(4): 611-625.
- [12] 郑婷婷. 螺旋侧板抑制海洋立管涡激振动的机理研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2013.
- [13] 丁勤卫, 李春, 王东华, 等. 螺旋侧板对漂浮式风力机平台动态响应的影响[J]. 动力工程学报, 2016, 36(8): 629-637.
- [14] Yeo D H, Jones N P. Computational study on aerodynamic mitigation of wind-induced, large-amplitude vibrations of stay cables with strakes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(4): 389-399.
- [15] Roddier D, Finnigan T, Liapis S. Influence of the Reynolds number on spar vortex induced motions (VIM): multiple scale model test comparisons[C] // ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, 2009: 797-806.
- [16] 苑健康, 黄维平. 二维立管 Helical Strakes 绕流场的 ANSYS-CFD 分析[J]. 船海工程, 2010, 39(4): 151-155.
- [17] 李红艳, 朱仁庆. 串列双立管涡激振动抑制研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(17): 54-59.
- [18] 沙勇, 曹静, 张恩勇, 等. 抑制涡激振动的螺旋列板设计参数研究[J]. 海洋工程, 2013, 31(1): 43-48.
- [19] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [20] 王亚非, 孙丽萍, 吴梓鑫. 螺旋侧板的导程对 VIV 影响的数值模拟[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(1): 175-179.
- [21] 鞠少栋, 陈国明, 盛磊祥, 等. 基于 CFD 的深水隔水管螺旋列板几何参数优选[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 110-113.
- [22] 林海花. 隔水管涡激动力响应及疲劳损伤可靠性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [23] Tezduyar T E, Shih R. Numerical experiments on downstream boundary of flow past cylinder[J]. Journal of engineering mechanics, 1991, 117(4): 854-871.
- [24] 王成官, 王嘉松, 田中旭, 等. 海洋隔水管涡激振动的三维数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2011, 26(4): 437-443.
- [25] Schlichting H. Boundary layer Theory[M]. New York: Mcgraw-hill Book Company, 1979.
- [26] 詹昊, 李万平, 方秦汉, 等. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 129-132.
- [27] Kravchenko A G, Moin P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re = 3900$ [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(2): 403-417.