

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.04.021

张力腿漂浮式风力机的运动响应计算

王 泉 王同光 曹九发

(南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室,南京,210016)

摘要:漂浮式风力机与近海桩基式风力机、陆上风力机差异很大,特别是漂浮平台设计复杂,对仿真工具要求更高。海上风力机除受气动载荷之外,还需进一步考虑海洋环境所施加的各种其他载荷。采用自由涡尾迹方法计算风力机气动性能,分别采用线性波和 PM 频谱模拟波浪运动并应用 Morison 方程计算波浪载荷。构建张力腿漂浮平台结构动力学方程,以气动载荷和波浪载荷为激励,得到平台响应,并反馈至气动计算,从而完成气动、结构和水动的耦合计算。最后以大型风力机 NH1500 为例,对张力腿式海上风力机进行仿真模拟,对比分析来流风速、浪高和波浪入流角对漂浮平台运动和风力机气动性能的影响,采用 PM 频谱模拟真实海况并计算漂浮式风力机动态响应,为漂浮式风力机设计提供了依据。

关键词:漂浮式风力机;张力腿平台;自由涡尾迹;波浪载荷;运动响应

中图分类号:O355;TK89

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2016)04-0583-07

Calculation of Motion Responses of Floating Wind Turbine with Tension Leg Platform

Wang Xiao, Wang Tongguang, Cao Jiufa

(Jiangsu Key Laboratory of Hi-tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Floating wind turbines are quite different from the inshore and onshore wind turbines. Especially their dynamic responses need more requirements of simulation for the complex floating motions. Floating wind turbines experience not only the air loads, but also the wave loads from the sea. A free vortex wake method is used to calculate the wind turbine aerodynamic loads. The wave motion is simulated based on the linear wave and the PM energy spectrum, and the Morison equations are used to calculate the wave loads. The structural dynamics equation for the tension leg platform is then solved to obtain the dynamic responses of the platform, in which the airloads and hydroloads are coupled and fed back to the aerodynamic calculation. For completeness, the aerodynamic and structural dynamic responses of a 1.5 MW wind turbine with the tension leg platform are simulated and the influence on the wind turbine aerodynamic characteristics of the platform motion is analyzed.

Key words: floating wind turbine; tension leg platform; free vortex wake method; wave load; motion responses

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三计划”)(2014CB046200)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20140059)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2015-06-11;**修订日期:**2016-01-14

通信作者:王同光,男,教授,博士生导师,E-mail: tgwang@nuaa.edu.cn。

引用格式:王泉,王同光,曹九发. 张力腿漂浮式风力机的运动响应计算[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(4): 583-589. Wang Xiao, Wang Tongguang, Cao Jiufa. Calculation of motion responses of floating wind turbine with tension leg platform[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016,48(4):583-589.

随着陆上风电场可开发资源的减少,海上风电开发已成必然。海上风力机与陆上风力机工作环境迥然不同,其主要区别在于,海上风力机除了气动载荷之外,还需要进一步考虑波浪等海洋环境的影响^[1-3]。漂浮平台可分为单柱平台、张力腿平台、驳船平台以及三者的组合^[4-5]。本文选取张力腿平台进行研究。

气动计算方法包括叶素动量理论、涡尾迹方法和计算流体力学方法(Computational fluid dynamics, CFD)。叶素动量理论简单快捷,工程应用广泛,但准确度并不高。CFD方法^[6]虽然能够模拟叶片上的复杂流动,但是计算效率低,消耗资源巨大,且受如网格划分、湍流模拟和转捩模拟等因素影响,限制了其在风力机计算中的应用。涡尾迹方法本质上具有旋涡特性,计算成本与CFD方法相比更小,比叶素动量理论更精确,且物理上比叶素动量理论更准确地考虑涡尾流的诱导作用,是模拟风力机较为灵活的数值工具。预定涡尾迹^[7-8]是根据大量的尾流场实验数据,建立尾迹形状的经验描述函数。与其相比,自由涡尾迹^[9-12]不需要涡元位置的实验数据,尾迹涡元允许在当地速度场的影响下自由变形,能够计算尾迹的畸变和卷起。对于气动、结构和水动的耦合计算,以及风力机的复杂运动和动态响应,自由涡尾迹有着更大的优势。

波浪模拟方法^[13]主要包括线性波理论、Stokes波理论和流函数方法。线性波理论假定波浪振幅与波长相比很小,水质点运动速度缓慢,因此可对势函数、边界条件以及连续条件作线性化处理,即对波浪运动一阶近似。Stokes波理论则保留波浪运动的三阶或者五阶项。流函数理论采用流函数描述波浪运动。通常采用频谱函数的方法,通过不同相位角的线性波叠加描述真实海况。得到波浪运动特性之后,采用Morison方程^[14]对波浪载荷进行计算。

本文构建张力腿漂浮平台动力学方程,以气动载荷和波浪载荷为激励,计算其纵荡、纵摇、横荡和横摇4个自由度响应,并反馈至气动计算,从而完成气动、结构和水动的耦合计算。最后,以大型风力机NH1500和张力腿漂浮平台为例,对漂浮式风力机进行仿真模拟,对比分析来流风速、浪高和波浪入流角对漂浮平台运动和风力机气动性能的影响,采用PM频谱模拟真实海况并计算漂浮式风力机动态响应,为漂浮式风力机设计提供了依据。

1 气动载荷

1.1 自由涡尾迹方法

1.1.1 叶片升力面

在Weissinger-L升力面模型中,叶片的升力特性用一条附着涡线模拟,附着涡线位于1/4弦线。叶片沿展向分成若干段叶素,每段叶素对应一个控制点,位于叶素中间剖面的3/4弦长处。叶片离散示意图如图1所示。

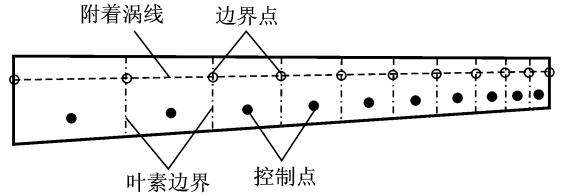


图1 叶片离散示意图

Fig. 1 Blade discretization

1.1.2 Biot-Savart 定律

涡元求解分析示意图如图2所示。由Biot-Savart定律确定的涡元对点P的诱导速度为

$$d\mathbf{V} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (1)$$

式中: \mathbf{V} 为诱导速度; Γ 为环量; $d\mathbf{l}$ 为涡元长度; \mathbf{r} 为点到涡元距离。积分可得

$$\mathbf{V} = \frac{\Gamma}{4\pi h} (\cos\theta_A - \cos\theta_B) \quad (2)$$

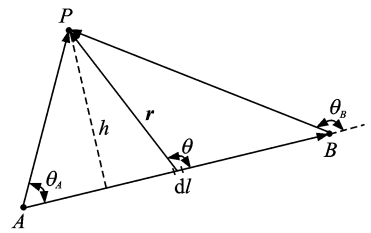


图2 涡元求解分析示意图

Fig. 2 Vortex element schematic for induction

1.1.3 尾迹控制方程

涡线示意图如图3所示。涡线的控制方程为

$$\frac{d\mathbf{r}(\psi, \zeta)}{dt} = \mathbf{V}_{loc}(\mathbf{r}(\psi, \zeta), t) \quad (3)$$

式中: ψ 为叶片方位角; ζ 为尾迹寿命角; \mathbf{V}_{loc} 为当地速度,包括自由来流速度 \mathbf{V}_0 和诱导速度 \mathbf{V}_{ind} ,即

$$\mathbf{V}_{loc}(\mathbf{r}(\psi, \zeta), t) = \mathbf{V}_0 + \mathbf{V}_{ind}(\mathbf{r}(\psi, \zeta), t) \quad (4)$$

本文采用时间步进法对涡线形状进行迭代求解,并使用预估-校正方法^[11]提高准确性。

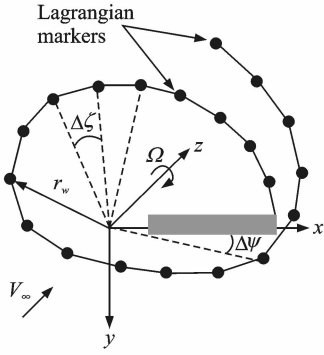


图3 涡线示意图

Fig. 3 Vortex filament

1.2 塔架载荷

对于上风向风力机,塔架所受气动载荷影响较小,因此仅用阻力计算公式对其做简单计算

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 S \quad (5)$$

式中: C_d 为阻力系数,本文取0.6; ρ 为空气密度; v 为来流速度; S 为塔架横截面积。

不同高度处的风速采用风剪切模型计算

$$v(h) = v(h_0) \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中: $v(h_0)$ 为参考高度 h_0 处的风速; α 为风剪切系数,与地形地貌相关,本文取0.12。

2 波浪载荷

2.1 波浪模拟

本文选取PM能量频谱进行波浪模拟,PM谱的峰频为

$$\omega_p = 0.877g/U \quad (7)$$

$$S(\omega) = \alpha \frac{g^2}{\omega^5} \exp \left\{ -1.25 \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right\} \quad (8)$$

式中: $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; U 为海面以上19.5 m高处的风速,轮毂风速为 10 m/s 时,通过上述风剪切模型计算得到 $U = 8.6 \text{ m/s}$ 。

对波浪频谱PM谱进行频率分割离散求出单个波的波幅为

$$A_n = \sqrt{2S(\omega_n) \Delta\omega} \quad \omega_n = n\Delta\omega \quad (9)$$

浪高函数为

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=1}^m A_n \cos \varphi_n \quad (10)$$

$$\varphi_n = -\omega_n t + \theta_n \quad (11)$$

式中: θ_n 为随机相位,在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布,以确保 $\eta(x, y, t)$ 的随机性。确定叠加谐波阶数 m 的标

准是随机波的谱密度函数 $S_{\eta}(\omega)$ 的积分面积至少要达到整个波普面积的95%;谐波数 k_n 可以由频散方程式求得

$$\begin{cases} \omega_n^2 = gk_n \tanh k_n d & \text{浅水区} (d < \frac{\lambda}{2}) \\ \omega_n^2 = gk_n & \text{深水区} (d > \frac{\lambda}{2}) \end{cases} \quad (12)$$

PM频谱与浪高如图4所示。

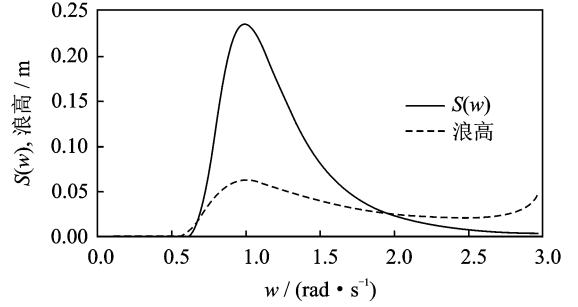


图4 PM频谱与浪高

Fig. 4 Frequency spectrum and wave height of PM

得到浪高函数后,可参考文献[14]得到水质点运动速度和加速度。

2.2 波浪载荷

波浪力的求解应用Morison方程。在深度 z ,水平波浪力由两部分构成:阻力和惯性力。波浪入流角定义为波浪方向与来流风向的夹角。作用在结构上的波浪载荷表达式为

$$F_{uxr} = C_m \frac{\rho \pi D^2}{4} (a_{uxr} - a_{sr}) + \rho A a_{uxr} + C_d \frac{\rho D}{4} (u_{uxr} - u_{sr}) |u_{uxr} - u_{sr}| \quad (13)$$

$$F_{uyy} = C_m \frac{\rho \pi D^2}{4} (a_{uyy} - a_{sy}) + \rho A a_{uyy} + C_d \frac{\rho D}{4} (u_{uyy} - u_{sy}) |u_{uyy} - u_{sy}| \quad (14)$$

式中: ρ 为海水密度; D 为垂直圆筒塔架的直径; a_{uxr}, a_{sr} 分别为水平方向上水质点和塔架的加速度; A 为垂直圆筒塔架的横截面积; u_{uxr}, u_{sr} 分别为水平方向上水质点和塔架的速度; C_m 为质量系数(或惯性系数),与被绕流物体的形状、绕流的流态以及物体剖面大小与波长的比值等因素有关。对于圆柱,当 $L \gg D$ 时, C_m 可取值1.0。关于阻力系数 C_d ,除在个别情况下有理论解答外,大多数情况下要依据试验确定。对于圆柱,当 $L \gg D$ 时,如果考虑疲劳载荷, $C_d = 1.25$ 。

3 张力腿平台动力学方程

张力腿平台分为纵荡、纵摇、横荡、横摇、垂荡

和艏摇6个自由度,如图5所示。由于垂荡和艏摇方向载荷和响应较小,因此只考虑前4个自由度。动力学方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (15)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵,具体形式可参考文献[13]; F 为外载荷,包括气动载荷与波浪载荷。首先通过气动与波浪载荷计算得到外部激励,然后通过Newmark方法进行时间步长推进,得到张力腿平台4个自由度响应,并将其反馈至气动和波浪载荷计算,从而完成气动、结构和水动的耦合计算。

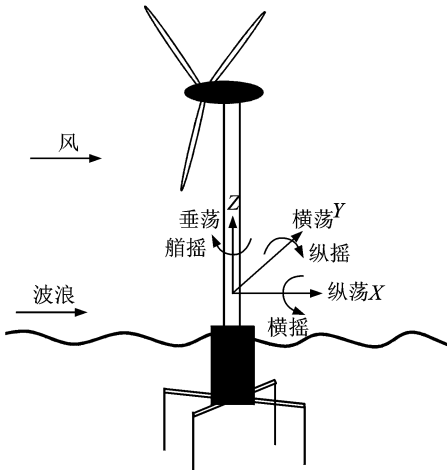


图5 张力腿漂浮平台

Fig. 5 Tension leg platform

4 方法验证与算例计算分析

4.1 计算方法验证

对大型风力机NH1500的功率系数 C_p 进行计算,并与实验数据对比,如图6所示。从图6可以看出,自由涡尾迹方法计算所得功率系数与实验值相比偏大,是因为自由涡尾迹方法只在涡核处考虑了粘性,而没有考虑流场中的粘性。总体来说,自由涡尾迹方法计算结果与实验值比较吻合,验证了该方法的准确性与可靠性。NH1500叶片数目为3,叶片半径为40.5 m,额定转速为17.2 r/min,额定功率为1 500 kW,额定风速为10.4 m/s,功率控制为变桨变速,塔架高度为63.0 m。

4.2 算例结果与分析

张力腿平台参数如表1所示。首先研究了风速大小对漂浮式风力机的影响,选取单一线性波模拟海况,波浪入流角为 0° ,浪高2 m,波浪周期10 s,来流风速取0,6,8,10和12 m/s。风速为0 m/s时,即考察波浪载荷对漂浮平台运动的影响。漂浮平

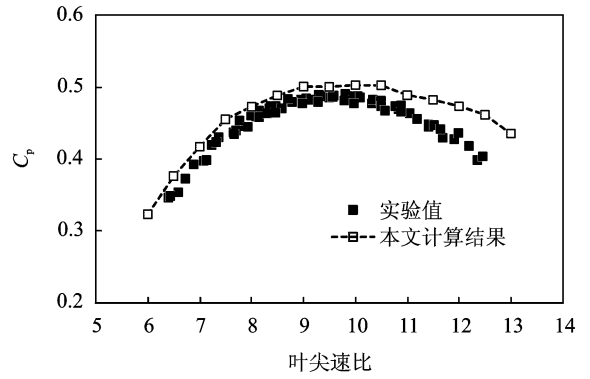


图6 NH1500功率系数对比

Fig. 6 Comparison of power coefficient of NH1500

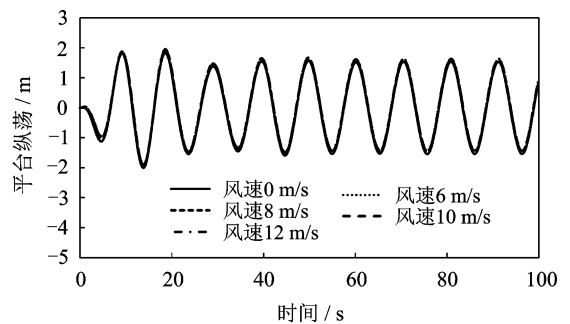
表1 张力腿平台设计参数

Tab. 1 Design parameters of tension leg platform

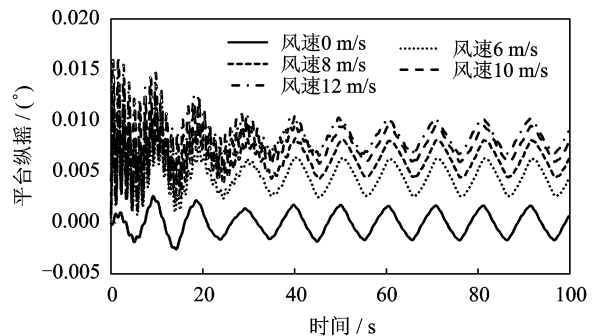
主要设计参数	具体数值
水下塔架高度及直径/m	10,6
扩展伸臂尺寸/m	3,3,20
设计水深/m,压载质量/t	100,1600
整体结构质心位置/m	(0,0,4)
转动惯量 $I_{xx}, I_{yy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$3.72 \times 10^9, 3.72 \times 10^9$
张力腿直径、壁厚、长度/m	0.5,0.03,80
张力腿弹性模量/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$,根数	$2.1 \times 10^{11}, 4$

台纵荡和纵摇响应,以及风速10 m/s时的波浪载荷与风轮推力如图7所示。

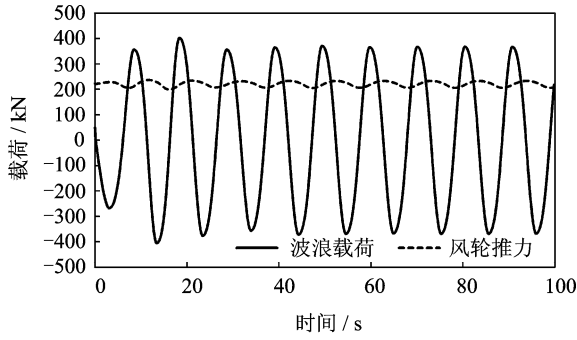
通过对比不同风速时漂浮平台纵荡运动,可以看出,风速大小对平台纵荡运动的影响并不显著,



(a) Displacement of platform surging



(b) Angle of platform pitching



(c) Loads of platform at 10 m/s wind speed

图 7 不同风速对风力机响应的影响

Fig. 7 Surging, pitching and loads of tension leg platform with different speeds

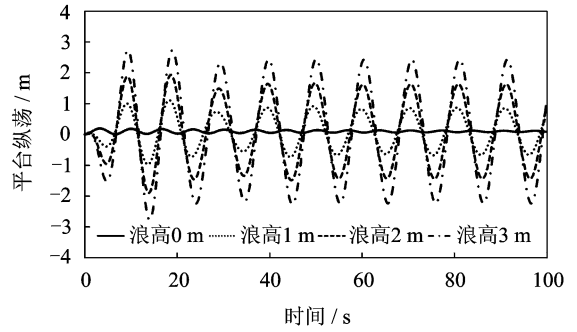
波浪载荷是平台往复运动的主要因素。对于纵摇运动,风速大小的影响则比较明显,这是由于风轮推力的力臂较长,产生的力矩较大,从而放大了风轮推力的影响。通过图 7(c)可以看出,风轮推力相对于波浪载荷较小,这与上述结果和分析是一致的。

然后计算不同浪高对平台运动和风力机气动性能的影响。来流风速为 10 m/s,选取单一线性波模拟海况,波浪入流角为 0° ,波浪周期 10 s,浪高为 0,1,2,3 m。浪高为 0 m 时,即考察气动载荷对平台运动的影响。计算结果如图 8 所示。

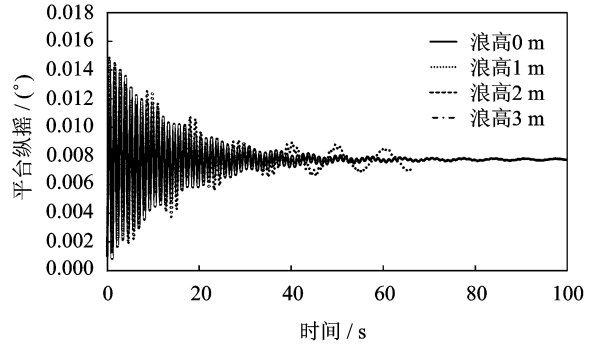
通过图 8 可以看出,浪高越大,水质点动能越大,波浪载荷也就越大,因此平台运动幅度也就越大,对功率系数造成的波动也就越大。但无论是平台运动,还是风力机功率系数响应,其平衡位置都是与无波浪入流时的响应基本一致。并且没有波浪入流时,只有气动载荷作用下的平台运动幅值较小,功率也比较稳定,因此波浪载荷是造成响应波动的主要原因。

再然后计算波浪入流方向对平台运动和风力机气动性能的影响。来流风速为 10 m/s,选取单一线性波模拟海况,浪高 2 m,波浪周期 10 s,波浪入流角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和 90° 。计算结果如图 9 所示。

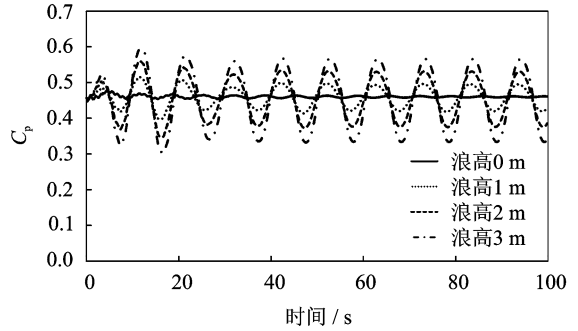
随着波浪入流角从 0° 增大到 90° ,波浪载荷在纵向的分量逐渐减小,横向分量逐渐增大。因此漂浮平台的纵荡、纵摇逐渐较小,而横荡、横摇则逐渐增强。平台纵摇的平衡位置约为 0.008° ,而横摇的平衡位置为 0° 左右,是由于风轮推力方向与平台纵向运动一致导致的,由于波浪载荷较大,风轮推力在纵荡横荡中作用不明显。风力机功率系数平衡位置基本不变,波动幅值逐渐减小,说明平台纵向运动的减小,导致功率系数波动的减小。虽然



(a) Displacement of platform surging



(b) Angle of platform pitching

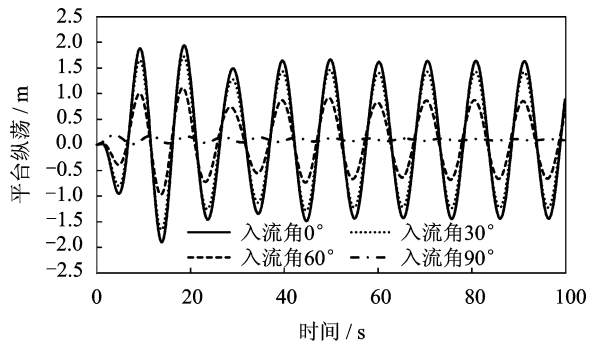


(c) Power coefficient

图 8 不同浪高对风力机响应的影响

Fig. 8 Response of wind turbine with different wave height

入流角 90° 时的横向运动和 0° 时的纵向运动幅值基本相等,但是横向运动造成的功率系数波动明显不如纵向运动影响大,这同样是由于平台纵向与来流风向一致,其波动对风力机气动性能的影响更为



(a) Displacement of platform surging

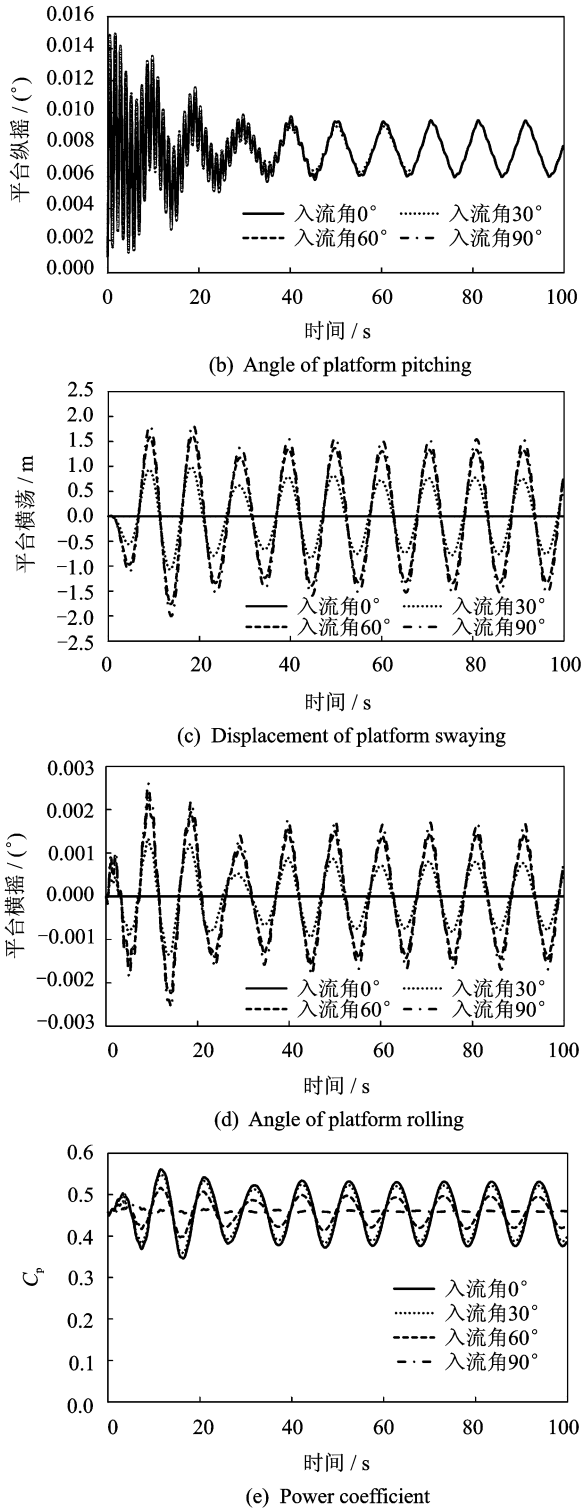


图9 不同波浪入流角对风力机响应的影响
 Fig. 9 Response of wind turbine with different inflow angles

直接显著。

最后应用 PM 频谱模拟波浪运动并进行计算，来流风速 10 m/s，波浪入流角 45°，波浪特性由频谱函数模拟得到。风力机功率系数、平台运动和载

荷如图 10 所示。

由于波浪模拟采取随机相位角，波浪载荷呈不规则波动。PM 频谱选取的参考风速较小(8.6 m/s)，因此由图 4 可以看出，各频率对应的浪高较小，导致与风轮推力相比，波浪载荷的幅值较小，所以

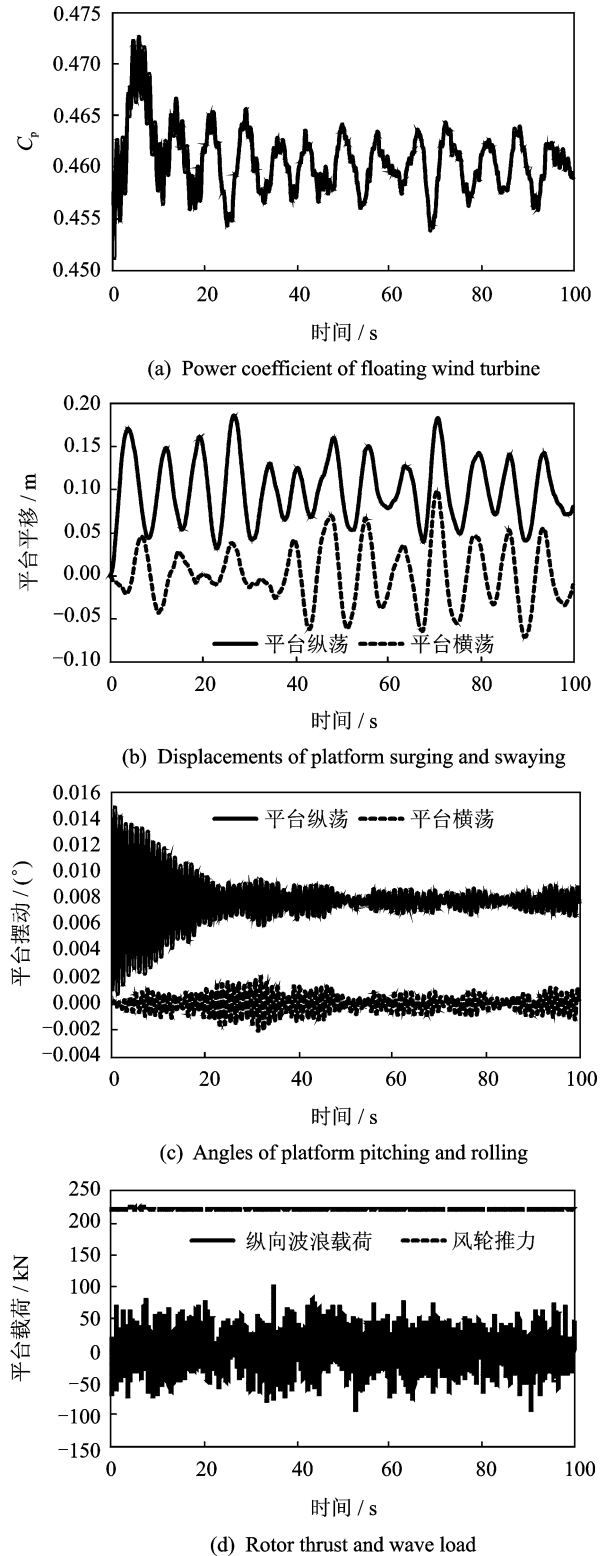


图10 漂浮式风力机动态响应
 Fig. 10 Response of floating wind turbine

此时平台运动的主要影响因素为风轮推力,但是波浪载荷的波动也对平台运动产生一定的影响,进一步导致风力机气动性能有一定波动。平台纵摇和横摇的幅值较小,纵荡和横荡的运动比较明显。由于风轮推力方向和平台纵向一致,导致纵荡方向平衡位置明显高于横荡方向,但是二者的波动幅值接近,说明波浪载荷是平台往复运动的主要原因,气动载荷则影响平台运动的平衡位置。同样,纵摇角度平衡位置明显大于横摇角度,而二者波动幅值较为接近。纵荡和横荡运动幅值均在 0.5 m 以内,纵摇和横摇运动幅值均在 0.1° 以内,表明了本文张力腿平台具有良好的稳定性。尽管平台运动幅度较小,但仍对风力机功率系数产生较大影响,因此对于漂浮式风力机,不仅需要严格控制平台运动,更需要针对其建立灵活的控制策略。

5 结 论

本文采用自由涡尾迹方法对风力机气动性能进行了计算,并通过算例验证了该方法的准确性和可靠性。对漂浮式风力机气动性能和平台响应进行了多种工况计算分析,得到了以下结论:

(1)平台运动受波浪载荷和气动载荷的综合作用,深海浪高超过 2 m 时,波浪载荷起主要作用。风轮推力决定平台运动的平衡位置,波浪载荷决定平台运动的幅值。

(2)浪高越大,造成的平台运动和功率波动幅值越大,但平衡位置基本不变。

(3)风力机的气动性能受平台纵向运动的影响较大,横向运动产生的影响较小。

(4)波浪载荷对风力机气动性能影响显著,因此不仅需要在结构上减小漂浮平台运动,更要建立灵活的控制策略及时调整风力机运行状态。

本文方法可以较好地模拟漂浮式风力机气动性能和平台动态响应,为漂浮式风力机设计提供依据。

参考文献:

- [1] Sebastian T, Lackner M A. Characterization of the unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines[J]. *Wind Energy*, 2013,16(3):339-352.
- [2] Karimirad M, Moan T. A simplified method for coupled analysis of floating offshore wind turbines[J]. *Marine Structures*, 2012,27(1):45-63.
- [3] Bae Y H, Kim M H. Coupled dynamic analysis of multiple wind turbines on a large single floater[J]. *Ocean Engineering*, 2014,92:175-187.
- [4] Xie Jiarong, Zhao Chengbi, Chen Xiaoming, et al. Effects of wind load on hydrodynamic performance of an offshore wind turbine semi-submersible platform[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014,477/478:114-118.
- [5] Lee H H, Wang P W. Analytical solution on the surge motion of tension-leg twin platform structural systems[J]. *Ocean Engineering*, 2000,27(4):393-415.
- [6] Sandersen B, Pijl S P, Koren B. Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics[J]. *Wind Energy*, 2011,14(7):799-819.
- [7] Dumitrescu H, Cardoso V. Wind turbine aerodynamic performance by lifting line method[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 1999,4(3):141-149.
- [8] Wang Tongguang. Unsteady aerodynamic modeling of horizontal axis wind turbine performance[D]. Glasgow: University of Glasgow, 1999.
- [9] Gaertner E M, Lackner M A. Modeling dynamic stall for a free vortex wake model[J]. *Wind Engineering*, 2015,39(6):675-692.
- [10] Rosen A, Lavie I, Seginer A. A general free-wake efficient analysis of horizontal axis wind turbines[J]. *Wind Energy*, 1990,14(6):362-373.
- [11] 许波峰,王同光. 基于涡尾迹方法和面元法全耦合风力机气动特性计算[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011,43(5):592-597.
Xu Bofeng, Wang Tongguang. Wind turbine aerodynamic performance prediction based on free-wake/panel model coupled method[J]. *Journal of Nanjing university of Aeronautics & Astronautics*, 2011,43(5):592-597.
- [12] Cao Jiufa, Wang Tongguang, Long Hui, et al. Dynamic loads and wake prediction for large wind turbines based on free wake method[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015,32(2):240-249.
- [13] 李春,叶舟,高伟,等. 现代陆海风力机计算与仿真[M]. 上海:上海科学技术出版社,2012.
Li Chun, Ye Zhou, Gao Wei, et al. Modern wind turbine calculation and simulation on land or sea[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2012.
- [14] 李德源,刘胜祥,张湘伟. 海上风力机塔架在风浪联合作用下的动力响应数值分析[J]. *机械工程学报*, 2009,45(12):46-52.
Li Deyuan, Liu Shengxiang, Zhang Xiangwei. Dynamic response numerical analysis of the offshore wind turbine tower under combined action of wind and wave[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009,45(12):46-52.

