doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.04.014

一种新型 Semi-Spar 式海上风机平台系泊系统优化分析

李秋辰,陈 兵*,刘雅楠
(大连理工大学,辽宁 大连 116024)

摘 要:参考英国的 Kincardine 风机采用的新式的 Semi-Spar 概念,结合 spar 式基础和半潜式基础的特点,提出了一种新式海上浮式风机平台模型,并基于三维势流理论,利用 AQWA 软件进行水动力计算,验证新式平台可靠性。分析了在风、浪、流荷载联合作用下,锚链竖向夹角、系缆数量对风机浮式平台运动性能和系泊张力的影响,对系泊系统进行优化,并验证极端工况下的可靠性。结果证明风机平台水平运动和纵摇运动幅值较小,但垂荡幅值略大,而通过减小锚链竖向夹角可以控制平台运动响应幅值,增加系缆数量可以同时减小系泊张力大小。计算结果证明了新型 Semi-Spar 式海上风机平台可行性,为浮式风机平台及系泊系统的设计提供参考。

关键词:Semi-Spar 平台;系泊系统优化;运动响应;系泊张力
中图分类号:P753 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-2029(2019)04-0085-06

随着对新能源需求的不断增长,风电行业的发展不断加速,相关的研究课题成为科研和工程界的热门议题。目前的海上风电研究多集中于近海风电,而水深大于 60 m 的深水海域风速大、持续时间长、风速稳定,潜藏着大部分的海上风电资源。要开发深远海风能资源,需要发展浮式风机技术。浮动式风机主要由风力发电机、浮动式基础和系泊定位系统 3 部分组成。

Henderson 等[1]通过研究多种浮式结构,发现三浮筒 (Tri-floater) 组合形式是浮式基础最优方案。Roddier 等[2-3]利用 NREL 提出的 5 MW 风机设计了一种半潜型浮式平台,分析频域与时域内的运动响应,还通过实验验证,并和 Spar 型平台进行了对比分析。Brommundt 等[4]提出了浮式风机系泊系统优化方法。Lefebvre 等[5]通过结构分析和经济技术性比较,对三浮筒式浮式风机进行了优化设计。邓静慧[6]对风机平台的静稳性特性、水动力性能、系泊的定位性能和稳定性进行研究。毛莹等[7]研究了系泊系统参数对浮式基础运动响应及其系泊张力特性的影响,提出系泊优化方法,并根据极端海况条件对浮式基础的主尺度和系泊系统进行改进。丁红岩等[8]提出一种新型全潜式浮式风机基础,并采用 FAST 软件耦合对不同风况下的浮式风机的动力特性进行耦合分析。肖越等[9]分析了预张力大小对半潜钻井平台横荡偏移及艏摇转动的影响。

本文借鉴了英国 Kincardine 风机采用的 Cobra 能源公司设计的一种新式的 Semi-Spar 海上风机概念,采用集成创新方法,将半潜式与 Spar 式平台的特点相结合,设计一种新式的大立柱跨距、小水线面、大潜没式风机平台,新式平台具有以下特点:(1) 平台立柱提供浮力,底部有固定压载,比较好地解决了拖航(Semi 形式)、在位运动性能(Spar)二者的冲突。(2) 平台装备主动压载系统,用于平衡俯仰力矩。(3) 整体安装、整体拖航、整体运输。本文使用 AQWA 水动力分析软件,对风机平台进行水动力性能分析,并在充分考虑风、浪、流和风机系泊系统的

收稿日期:2019-03-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51761135011)
作者简介:李秋辰(1993-),男,硕士研究生,主要研究港口海洋工程技术。E-mail:liqiuchen28@163.com
通讯作者:陈兵(1970-),男,博士,副教授,主要从事海洋工程及海洋新能源的研究工作。E-mail:chenbing@dlut.edu.cn

耦合作用下，通过时域分析研究系泊参数对基础运动响应和系泊缆的张力的影响，对系泊系统进行优化设计，验证极端工况下的可靠性。

1 Semi-Spar 式海上风机平台参数

本文选用的风机模型为美国可再生能源研究所(NREL)发布的 5 MW 风机模型，风机的主要参数见表 1。

表 1 5 MW 风机参数

参数	数值	参数	数值
切入风速/m·s^{-1}	3	塔柱高度/m	90
切出风速/m·s^{-1}	25	塔柱质量/kg	347 460
叶片直径/m	126	叶片质量/kg	110 000
轮毂直径/m	3	机舱质量/kg	240 000

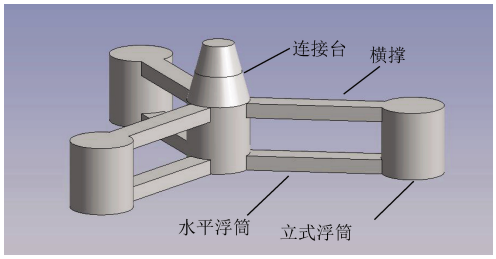


图 1 Semi-Spar 式海上风机基础

针对 5 MW 风机模型，参考 Semi-Spar 海上风机概念，设计了图 1 所示浮式风机平台基础。Semi-Spar 式海上风机基础由立式浮筒、水平浮筒、横撑和连接台共 4 个部分组成。立式浮筒、水平浮筒和横撑均位于水面以下，立式浮筒上表面距离水面 8 m。立式浮筒、水平浮筒为浮式基础提供浮力，横撑起到固定支撑作用，浮筒内设有压舱水。包含风机结构的海上风机平台具体参数见表 2。

表 2 Semi-Spar 式海上风机平台主要尺度参数

参数	数值	参数	数值
基础吃水/m	20	基础重心高度(距水面以下)/m	14.3
立式浮筒直径/m	13	基础质量(钢)/kg	5 164.4
立式浮筒高度/m	14	基础排水体积/m^3	10 332.8
立式浮筒中心距离/m	40	压舱水质量/kg	5 426.7
水平浮筒宽度/m	5	基础横摇转动惯量/(kg·m^2)	5.14×10^9
水平浮筒高度/m	3	基础纵摇转动惯量/(kg·m^2)	5.14×10^9
连接台高度/m	14	基础艏摇转动惯量/(kg·m^2)	9.74×10^9

Semi-Spar 式浮式平台通过系泊系统与压舱水重力平衡基础自身产生的浮力，基础将浮筒浸入水面以下，这种大潜没式结构使得平台重心较低，理论上可以获得较好的运动性能，减小了不利荷载，一定程度上降低对于系泊系统的要求。

2 数值方法

2.1 理论基础

AQWA 软件主要解决浮体在环境荷载下的运动响应、系泊定位、海上安装作业、船舶航行以及波浪荷载传递等问题，其理论基础主要有：浮体静力学、刚体动力学、三维势流辐射-绕射理论、莫里森方程、缆索动力学等。

2.2 风荷载计算

风荷载包括风对风机叶片的荷载和对风机塔柱的荷载。均匀定常风对叶片的推力可以使用叶素动量定理计算：

$$F_T=\frac{1}{2}\rho_a A U^2 C_{FB} \tag{1}$$

式中：ρ_a 为空气密度；A 为叶片扫掠面积；U 为风速；C_{FB} 为推力系数，是与风速相关的函数。塔柱的荷载可以用式(2)计算：

$$F_w=0.613(\Sigma_{i=1}^{n}(C_h C_s A_i(\alpha))U^2) \tag{2}$$

式中：U 为风速；C_h 为受风构件高度系数；C_s 为受风构件形状系数；$A_i(\alpha)$为风向角为 α 时第 i 个构件的在风向上的投影面积。

2.3 频域分析

浮体运动的幅值响应算子(RAO)的含义是浮体运动幅值与波幅的比，表明在线性波浪作用下浮体的运动响应特征。以浮体的横摇运动为例，横摇 RAO 为浮体在单位波幅的规则波作用下所产生的，关于波浪频率的横摇运动幅值函数，近似表达式为：

$$Roll_{RAO}=\frac{\theta_x}{\xi_\alpha}=DAF_{Roll}\frac{\omega^2}{g}57.3\sin\beta \tag{3}$$

式中：θ_x 为浮体横摇运动幅值；ξ_α 为入射波波

幅；DAF_{Roll} 为横摇运动方程得到的动力放大系数；ω^2 为入射波圆频率，β 为入射波角度。RAO 描述的是线性条件下入射波幅与浮体运动幅值的关系。

2.4 时域分析

对于有系泊系统的浮式结构物，运动方程可以写为：

$$\Sigma_{j=1}^{6}[(a_{ij}+m_{ij}(t))\ddot{x}_j(t)+\int_0^t K_{ij}(t-\tau)\dot{x}_j(\tau)\mathrm{d}\tau+C_{ij}x_j(t)]=F_i(t)$$

$$i=1,\cdots,6 \tag{4}$$

式中：$[a_{ij}]$为浮体的惯性质量矩阵；$[m_{ij}(t)]$为浮体的附加质量矩阵；$[K_{ij}(t)]$为延迟函数矩阵；$[C_{ij}]$为静水恢复力矩阵；$[F_i(t)]$为波浪激励力；$[x_j(t)]$为浮体位移矩阵。

3　水动力特性分析

水动力性能分析主要是研究浮体在波浪力作用下的运动规律，分析浮式平台在不同周期的波浪作用下产生的运动响应情况，使浮体的自振周期能避开主要波浪周期范围，防止发生共振。所以在频域分析中仅考虑了波浪荷载的作用，并没有加入风荷载的影响。利用 AQWA 软件建立风机浮式平台水动力分析模型。工作水深设计为 80 m。选择波浪周期范围为 2~62.8 s，波高为 1 m，波浪方向为-180°~180°，间隔为 30°，计算坐标和波浪方向示意图见图 2。通过水动力分析完成后得到附加质量曲线后，对 6 个自由度运动进行粘性阻尼修正。重新进行水动力分析后得到 6 个自由度的幅频响应曲线，结果见图 3。

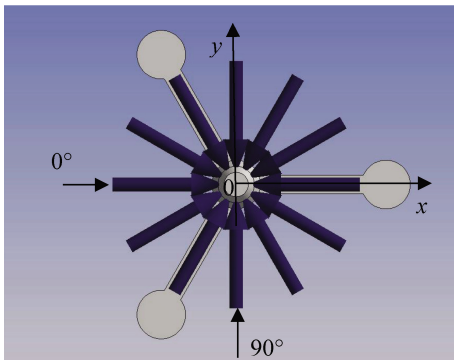
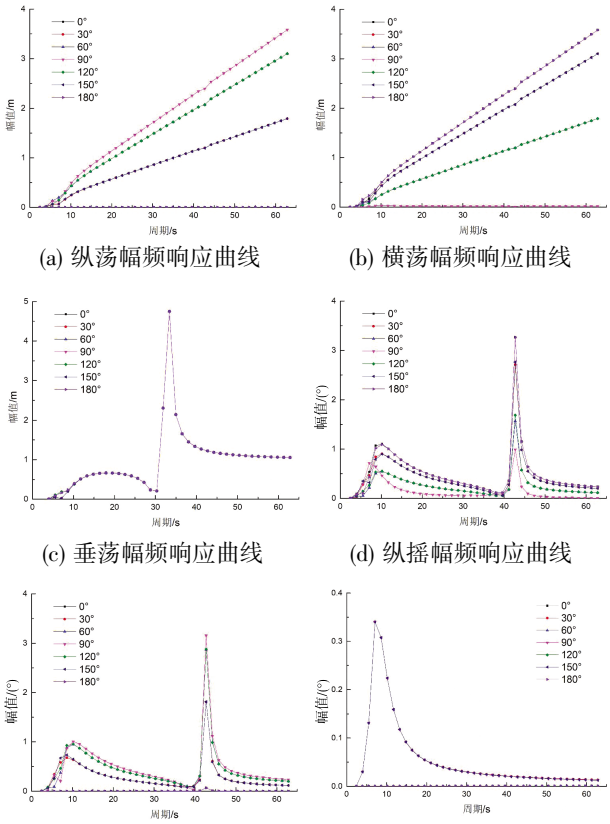


图 2　荷载方向示意图

从图 3 中可以看出，浮式平台的横荡、纵荡幅值会随波浪周期增大而增大。垂荡幅值随波浪角度变化不大，随着波浪周期增加先增大后减小，然后突然达到最大值后减小。纵摇、横摇曲线的趋势与



(a) 纵荡幅频响应曲线　(b) 横荡幅频响应曲线

(c) 垂荡幅频响应曲线　(d) 纵摇幅频响应曲线

(e) 横摇幅频响应曲线　(f) 艏摇幅频响应曲线

图 3　风机基础频响应曲线

垂荡曲线类似，纵摇运动最大幅值出现在浪向角 0°的情况，横摇运动最大幅值出现在浪向角 90°的情况，艏摇幅值较小，接近于 0。浮式平台的纵摇和横摇自振周期在 42 s 左右，垂荡自振周期在 33 s 左右，而我国沿海波浪周期一般不会超过 30 s，所以可以避开大部分海况的波浪周期范围。

4　时域系泊分析

为了研究浮式平台在实际海况中的运动性能，综合考虑了风荷载、流荷载、波浪荷载作用与系泊系统的耦合作用，建立时域计算模型。由于海域中风速风向随时间的变化较为缓慢，因此在一定的时间段内可以认为风速和风向不变，将其考虑为均匀定常风。工作水深设计为 80 m。风谱使用 NDP 风谱，1 h 内平均风速为 11.4 m/s。海面表面流速为 0.8 m/s。波浪为不规则波，波浪谱为 JONSWAP 谱，波浪有义波高 H_s=2.5 m，谱峰周期 T_P=7.1 s，谱峰因子 $Gamma$=3.3，风、浪、流方向均为 0°。通过对迎风、迎流面积进行求和计算，推导出对应的风流力系数数据来进行风荷载及流荷载的计算。

系泊系统是影响海上浮式风机系统运动响应的关键性因素之一。文中设计了 3 种系泊方式，通过考察系泊角度、系缆数量等对浮式平台运动响应及系泊张力的影响规律，获得相对优化的系泊布置方式。系泊采用 3 根锚链，间隔 120°，导缆孔与锚固点的水平距离设为 500 m。根据 DNV [10]的相关建议，系泊材质为 78 mm 钢芯钢缆，空气中质量 116 kg/m，轴向刚度 307 236 kN，破断力 5 123 kN，附加质量系数为 1.0，拖曳力系数 1.2，长度 654 m，预张力 1 366 kN。系泊布置及系泊缆编号见图 4。时域分析方式为考虑低频荷载影响的不规则波分析，时间步长为 0.1 s，总共模拟 3 600 s。分析计算得到的风机平台运动响应和锚链张力时历曲线见图 5。计算 5 个不同的随机波浪种子条件下浮式平台的运动响应和系泊张力结果并进行统计，得到结果见表 4~表 5。

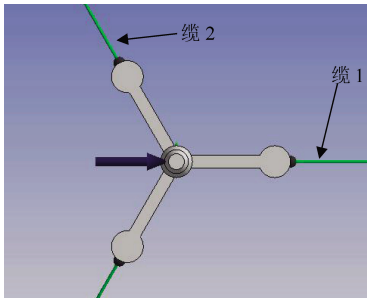


图 4 系泊布置及系泊缆编号

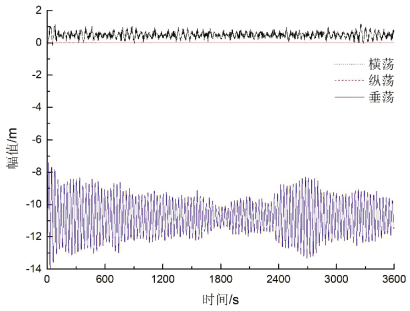
表 4 平台的运动响应统计结果

	横荡/m	纵荡/m	垂荡/m	横摇 /(°)	纵摇 /(°)	艏摇 /(°)
最大值	1.114	0.026	5.339	0.111	2.942	0.084
最小值	−0.339	−0.008	−0.042	0	−1.227	−0.081
平均值	0.375	0.008	2.3	0.04	0.81	0

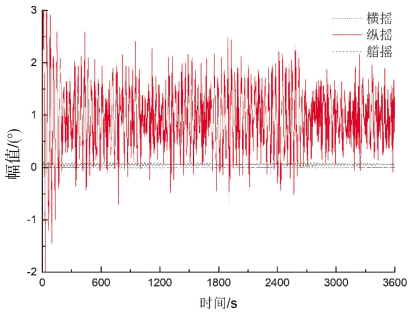
表 5 平台的系泊张力统计结果

	缆 1	缆 2
缆绳张力设计值/N	1 827 760	1 913 829
安全系数	2.80	2.68

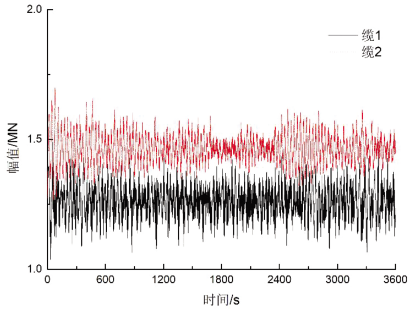
李梦阳[11]认为浮式风机在正常作业时，平台的水平位移应不大于水深的 5%，在自存工况下，应不大于水深的 10%。Zambrano 等[12]指出，在正常作业状态下，浮式风电系统平均俯仰角度应小于 5°，最大俯仰角度应小于 15°。由计算统计结果可以看出，浮式基础在平衡位置最大纵荡偏移为 1.11 m，最大升沉幅值为 5.3 m，最大横摇幅值为 0.11°，最大纵摇幅值为 2.94°，艏摇接近 0°。基础的横摇、纵摇较小，说明风机的俯仰角度较小，但是平台垂荡幅值较大。缆绳最大张力为



(a) 横荡、纵荡、垂荡曲线



(b) 横摇、纵摇、艏摇曲线



(c) 缆 1、缆 2 张力曲线

图 5 平台运动响应和锚链张力时历曲线

1 914 kN，安全系数为 2.68，根据规范 API RP 2SK，单点系泊装置建造与入门规范自存安全系数为 1.67，作业安全系数为 2.25，符合 API 规范要求。

4.1 改变系泊角度

系泊仍然采用 3 根锚链，间隔为 120°，导缆孔与锚固点的水平距离由 500 m 改为 300 m。计算结果见表 6~表 7。

表 6 平台的运动响应统计结果

	横荡/m	纵荡/m	垂荡/m	横摇 /(°)	纵摇 /(°)	艏摇 /(°)
最大值	1.115	0.034	4.362	0.118	3.229	0.092
最小值	−0.777	−0.010	−0.050	−0.001	−1.758	−0.089
平均值	0.13	0.01	1.98	0.05	1.41	0

表 7 平台的系泊张力统计结果

	缆 1	缆 2
缆绳张力设计值/N	2 257 217	2 201 943
安全系数	2.27	2.32

通过系泊优化之后可以看出,随着竖向系泊角度减小,升沉最大幅值得到减小,增强基础安全稳定性能。但同时系缆力有所增加,但安全系数让在 API 规范范围内,纵摇度数略微增加,但仍在规定的±5°内。

4.2 增加系缆数量

系泊采用 6 根锚链,间隔为 60°,导缆孔与锚固点水平距离为 500 m,系缆布置方式及缆绳编号见图 6。计算结果见表 8~表 9。

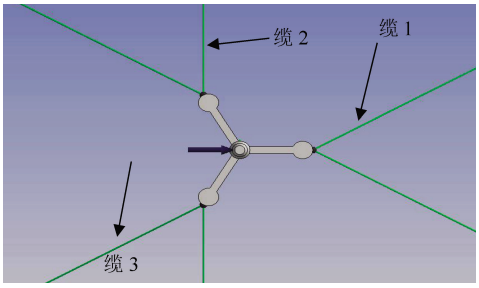


图 6　增加系缆数量后的系缆布置方式及缆绳编号

表 8　改变系缆数量后的平台的运动响应统计结果

	横荡/m	纵荡/m	垂荡/m	横摇/(°)	纵摇/(°)	艏摇/(°)
最大值	0.828	0.018	3.807	0.088	2.399	0.003
最小值	-0.344	-0.008	-0.134	-0.001	-0.887	-0.001
平均值	0.19	0.003	1.805	0.034	1.05	0

表 9　改变系缆数量后的平台的系泊张力统计结果

	缆 1	缆 2	缆 3
缆绳张力设计值/N	1 606 559	1 643 377	2 167 379
安全系数	3.56	3.48	3.33

增加系缆数量之后可以看出,缆绳张力大大减小,垂荡最大幅值和纵摇最大幅值都大幅减小,基础运动稳定性得到增强。

4.3 极限工况分析

极限工况参数选择水深为 80 m,风谱使用 NDP 风谱,1 h 内平均风速为 30 m/s。海面表面流速为 2 m/s。波浪为不规则波,波浪谱为 JONSWAP 谱,波浪有义波高 H_S=7.5 m。系泊系统使用优化过的系泊方式,减小了系泊角度,增加系泊缆数量。计算结果见表 10~表 11。

表 10　极限工况下平台的运动响应统计结果

	横荡/m	纵荡/m	垂荡/m	横摇/(°)	纵摇/(°)	艏摇/(°)
最大值	3.561	0.015	5.056	0.079	12.476	0.015
最小值	-1.422	-0.006	-1.422	0	-3.863	-0.001
平均值	0.988	0.002	1.76	0.03	4.21	0.005

表 11　极限工况下平台的系泊张力统计结果

	缆 1	缆 2	缆 3
缆绳张力设计值/N	1 435 467	1 470 106	1 537 826
安全系数	3.18	3.11	2.36

根据计算结果可以看出,在极端工况下浮式平台的最大水平位移为 3.56 m,小于水深的 10%,纵摇的最大幅值为 12.5°,小于 15°,缆绳最大张力的安全因子均大于 2.25,浮式平台在垂荡和纵摇值较大时会发生迎浪面侧浮筒露出水面的情况,但数值结果仍符合规范要求,即系泊系统在极端工况下依然安全。

5 结 论

本文综合半潜式和 Spar 式海上风机平台的特点,提出一种新式的 Semi-Spar 概念,并利用 AQWA 软件建立浮式平台基础模型,综合考虑风、流和波浪环境荷载与系泊系统系统的耦合作用,研究了浮式平台的运动响应及系泊张力特性,并提出优化系泊布置的方法,得到结论如下:(1) 风机平台纵摇横摇自振周期在 42 s 左右,垂荡自振周期在 21 s 左右,可以避开常见的波浪周期范围。平台具有良好的耐波性。(2) 通过时域分析可以看出,本文提出的浮式基础的结构形式、基本尺寸和系泊布置,基本性能满足规范要求,平台运动的横荡、纵摇较小,但垂荡幅值偏大,可以考虑在平台底部增加张紧式系泊缆。(3) 通过减小系泊角度可以减小平台最大垂荡幅值,但系泊张力会有所增加,在增加系缆数量之后,垂荡幅值和系泊张力都有显著减小。在极端工况下风机系统依然可以安全工作。

参考文献:

[1] Henderson A, Bulder B, Huijsmans R , et al. Feasibility study of floating windfarms in shallow offshore sites [J]. Wind Engineering, 2003,5(5): 405-418.

[2] Roddier D, Cermelli C, Aubault A, et al. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2010, 2(3): 53–87.

[3] Roddier D, Peiffer A, Aubault A, et al. A generic 5 MW windfloat for numerical tool validation & comparison against a generic spar[C]// Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rofferdam:ASME, 2011: 2011–50278.

[4] Brommundt M, Krause L, Merz K, et al. Mooring system optimization for floating wind turbines using frequency domain analysis[J]. Energy Procedia, 2012, 24: 289–296.

[5] Lefebvre S, Collu M. Preliminary design of a floating support structure for a 5 MW offshore wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2012, 40:15–26.

[6] 邓慧静.海上浮式风机平台稳性及锚泊系统性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.

[7] 毛莹,范菊,张新曙,等. 风浪流中半潜式风机系统动力响应特性研究[J]. 海洋工程,2017,35(01):60–70.

[8] 丁红岩,韩彦青,张浦阳,等. 全潜式浮式风机基础在不同风况下的动力特性研究[J]. 振动与冲击,2017,36(06):201–206+228.

[9] 肖越,王言英. 浮体锚泊系统计算分析[J]. 大连理工大学学报, 2005(05): 682–686.

[10] Anchors V. Anchor Manual 2010–The Guide to Anchoring[M]. Rotterdam: Vryhof Anchors, 2010.

[11] 李梦阳. 海上浮式风力机平台锚泊系统设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.

[12] Zambrano T, Maccready T, Kiceniuk T, et al. Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in Gulf of Mexico storm conditions[C]// 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2006: 629–634.

Optimization Analysis on the Mooring System of a New Type of Semi–Spar Wind Turbine Platform

LI Qiu–chen, CHEN Bing, LIU Ya–nan

Dalian University of Technology, Dalian 116024, *Liaoning Province, China*

Abstract: With a reference Province, to the Semi–Spar concept adopted by Kincardine turbine in Britain, and combined with the advantages of the Spar foundations and semi–submersible foundations, a new type of offshore floating wind turbine platform model is proposed in this paper. Based on the three–dimensional potential theory, the AQWA software is applied for hydrodynamic calculation to verify the reliability of this new platform. Under the combined action of wind, wave, and current, the influences of the vertical angle and the number of the mooring chains on the motion of the platform and the tension of the mooring chains are analyzed respectively by the dynamic method. The mooring system is optimized and verified under extreme conditions. The results show that the horizontal motion and pitch amplitude of the fan platform are small, but the heave amplitude is slightly larger. The amplitude of the motion response can be controlled by reducing the vertical angle of the anchor chain, while the mooring tension can be reduced by increasing the number of mooring cables. The calculation results have proved the feasibility of the new Semi–Spar offshore wind turbine platform, and provide reference for the design of floating wind turbine platform and mooring system.

Key words: Semi–Spar platform; optimization of the mooring system; motion response; mooring chain tension