# 风浪夹角变化对海上浮式风机系泊的影响

## 邓 露<sup>1</sup>, 吴松熊<sup>1</sup>, 钟文杰<sup>1</sup>, 宋晓萍<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 2. 湘电风能有限公司,湖南 湘潭 411102)

摘 要:海上风机结构的设计中通常只考虑共线风浪。然而浮式风机的动力特性与传统的固定式风机有显著 不同,风浪荷载对其结构的影响仍需进行深入研究。为探究风浪夹角变化对浮式风机系泊的影响,采用 FAST--Orcaflex 软件建立了浮式风机的耦合模型并进行了时域分析,得到了多种代表海况及不同风机运转状态下系泊 的张力和平台的运动响应,并对模拟结果进行了分析。结果表明:共线风浪会造成最大的系泊张力以及除艏摇 外最大的平台运动响应;但在温和海况下,风机停机时,不共线风浪会造成更大的系泊疲劳损伤。因此建议:在 评估温和海况下系泊的疲劳损伤时,至少考虑风机停机状态下风浪夹角为0°和90°的工况;在系泊的疲劳寿命 评估中,应结合风浪作用方向散布图,考虑温和海况下的风浪不共线工况。

关键词:海上风机; 荷载分析; 风浪联合作用; 系泊疲劳; FAST-Orcaflex 耦合 中图分类号: P75; TK89 文献标识码: A 文章编号: 2095-0985(2018) 01-0001-06 DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2018.01.001

## Influence of Wind-wave Intersection Angle Change on the Mooring System of Floating Offshore Wind Turbines

DENG Lu<sup>1</sup>, WU Song-xiong<sup>1</sup>, ZHONG Wen-jie<sup>1</sup>, SONG Xiao-ping<sup>2</sup>
(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. XEMC Windpower Co Ltd, Xiangtan 411102, China)

Abstract: Conventionally, the aligned wind and waves is considered the worst load case in designing an offshore wind turbine. However, the dynamic characteristics of floating offshore wind turbines (FOWT) differ from fixed wind turbines and the effects of the wind-wave loads on the FOWTs still require further investigation. In order to study the effects of misaligned wind and waves on the performance of mooring system of the FOWTs, FOWT models were adopted and the time domain simulations using the FAST-Orcaflex software were conducted accounting for variable wind-wave intersection angles. In the study, multiple sea states and different operational conditions were considered and results of tensions in selected mooring line and the platform motion responses were obtained from the simulation. Furthermore, detailed analysis of the results were performed. It is revealed that under aligned wind and waves , the largest tension in mooring line occur , along with the greatest platform motions ( in five degrees of freedom except yaw). However , the misaligned wind and waves may cause greater fatigue damage in the mooring line in the moderate sea states when the wind turbine is parked. Therefore, it is suggested that two wind-wave intersection angles should be accounted for , i.e.  $0^{\circ}$  and  $90^{\circ}$  , when assessing the fatigue damage of the mooring lines under moderate sea states. For the long-term fatigue analysis of the mooring lines , misaligned wind and waves should be considered with reference to the wind and wave direction distribution scatter diagram. Key words: offshore wind turbine; loads analysis; combined wind-wave action; mooring line fatigue;

FAST-Orcaflex coupling

收稿日期: 2017-02-23 修回日期: 2017-04-25

作者简介:邓 露(1984),男,湖南娄底人,教授,博士,研究方向为海洋平台优化设计、车桥耦合振动(Email: denglu@hnu.edu.cn) 基金项目:国家 863 计划项目(2013AA050603);湖湘青年创新创业平台(858201147) 为了更好地开发深水海域丰富的风能资源, 近年来,研究人员对海上浮式风机进行了大量研究<sup>[1,2]</sup>。不同于固定式海上风机,浮式风机基础 平台漂浮于海面,通过系泊来限制其位移,这造成 其动力特性与固定式风机有很大差异。因此,复 杂的环境荷载对浮式风机的影响仍然有待更深入 的研究,这也是目前浮式风机的研究中面临的关 键挑战之一<sup>[3]</sup>。

风浪联合作用时,风荷载与波浪荷载作用方 向成一定夹角的工况称为风浪不共线工况。实测 数据表明,风浪不共线工况普遍存在<sup>[4]</sup>。固定式 海上风机的设计中,通常采用共线风浪作为最不 利工况进行计算<sup>[5,6]</sup>;柱稳式油气平台的系泊设 计也只考虑风浪共线的工况<sup>[7,8]</sup>。目前,浮式风 机设计时考虑的荷载工况仍采用固定式风机规范 中的设计荷载工况,但浮式风机动力特性不同于 固定式风机,不共线风浪对其结构是否有不利影 响,仍然有待深入研究。最新的 DNV 浮式风机设 计规范<sup>[8]</sup>中指出,风浪作用夹角变化引起的气动 阻尼变化对平台运动响应,尤其是对风机的疲劳 会产生不利影响,因此浮式风机的设计需要慎重 考虑不共线风浪。

目前,已有学者研究了风浪作用夹角变化对 浮式风机平台及上部塔架的影响。Philippe 等<sup>[9]</sup> 发现在风浪不共线时,驳船式风机平台某些自由 度的运动响应会增大。Barj 等<sup>[10]</sup>研究发现只考 虑风浪共线工况会低估单柱式风机塔底的侧向疲 劳损伤,因此建议单柱式风机塔架的设计至少要 考虑风浪共线与风浪 90 度夹角的工况。美国船 级社<sup>[3]</sup>以及 Bachynski 等<sup>[11]</sup>则认为,虽然不共线 风浪会增大浮式风机平台的部分运动响应及塔底 侧向弯矩,但是其增值并不大。以上研究均以浮 式风机平台及塔架为对象,而没有考虑过风浪作 用夹角变化对系泊系统的影响。

基于以上研究背景,本文采用气动 – 水动 – 伺服 – 弹性 – 系泊全耦合模拟工具 FAST-Oreaflex<sup>[12]</sup>,建立了两种典型的悬链式系泊浮式风机数 值模型,采用某海域实测风浪联合海况数据,考虑 多种海况下风机正常运转和停机顺桨的情况,研 究了风浪作用夹角改变时,风机平台的运动响应、 系泊的张力及系泊疲劳损伤的变化情况。本文的 研究结果将为海上浮式风机设计中荷载工况的选 取提供重要参考依据。

## 1 风机模型

#### 1.1 风机主要参数

采用悬链式系泊的浮式风机主要是半潜式和 单柱式。风机平台模型采用美国国家可再生能源 实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)的半潜式平台 OC4-DeepCwind<sup>[13]</sup>和单柱 式平台 OC3-Hywind<sup>[14]</sup>,如图 1 所示。平台装配 NREL 5MW 水平轴风力发电机,并采用 OC3-Hywind 控制系统<sup>[15]</sup>。风机平台与风力发电机主要 参数见表 1。半潜式风机平台的设计水深为 200 m 边浮筒上下部分直径分别为 12 24 m,中间浮 简直径 6.5 m。单柱式风机平台设计水深为 320 m,上下立柱直径分别为 6.5 9.4 m,中间以圆台 连接过渡。



图1 浮式风机模型

表1 浮式风机主要参数

参数	OC4-DeepCwind	OC3-Hywind			
<b>水深</b> /m	200	320			
平台质量/t	13473	7466			
吃水深度/m	20	120			
横荡纵荡周期/s	113.6	43			
垂荡周期/s	17.2	28			
横摇纵摇周期/s	27	32			
艏摇周期/s	82	5.2			
风轮直径/m	128	128			
轮毂高度/m	90	90			
机舱转子质量/t	350	350			
塔架质量/t	347.5	347.5			
额定风速/(m/s)	11.4	11.4			

两种形式的风机均采用多点悬链系泊,如图 2 所示,详细参数可参见文献[13,14]。为了增大 平台艏摇刚度,单柱式风机导缆孔处采用了系泊 三角连接结构,在数值模拟中,通过添加艏摇自由 度上的弹簧进行模拟<sup>[14]</sup>。



图 2 系泊系统布置/m

#### 1.2 风机耦合模型

风机的数值模拟采用 FAST-Orcaflex 耦合软件。FAST 为美国国家可再生能源实验室(NREL)的开源风机仿真软件,用于模拟风力机及风机塔架,不同的模块分别用于计算空气动力、弹性动力以及模拟风机控制系统等。Orcaflex 则采用集中质量法模拟系泊系统,其模型的平台水动力参数由以WAMIT 为核心程序的HydroD软件计算得到。FAST 与 Orcaflex 之间通过动态链接库 FASTLink 传递数据。国际能源署(International Energy Association, IEA)的风能项目 Off-shore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4)验证了 FAST-Orcaflex 耦合工具的可靠性<sup>[12]</sup>。

浮式风机可分为上部风力机、浮式平台和系 泊系统三部分。浮式平台的水动力模型同时考虑 了势流理论与莫里森方程,采用 HydroD 软件计 算得到平台的一阶水动力幅频响应算子(RAOs)、 二阶传递函数(QTF)、附加质量与附加阻尼等水 动力参数,并输入 Orcaflex 中进行参数化建模,海 水黏性则通过在 Orcaflex 中选加各构件的拖曳力 系数来近似模拟<sup>[13,14]</sup>。风机的系泊系统由 Orcaflex 采用集中质量法模拟,在 Orcaflex 中,随机波 浪采用 JONSWAP 谱生成,采用莫里森方程计算 系泊的水动力荷载。

风力机及风机塔架则采用 FAST 的不同模块 进行模拟。湍流风场采用 IEC 规范中的正常湍流 风模型(NTW)。湍流风可分解为平均风和脉动 风两部分。其中平均风速部分采用幂定律风廓线 描述 幂律指数 α 取 0.14; 脉动部分则用模拟目标 风谱的办法采用 Turbsim<sup>[16]</sup> 生成,目标风谱选取 IEC-61400-3 规范中的 Kaimal 风谱,根据 IEC 规 范取湍流强度为 0.12。风机叶片受到的空气动力 荷载则通过叶素动量理论计算获得。

## 2 工况设置

选取4种具有代表性的海况进行研究,如表 2 所示。海况1~3分别代表风速小于额定风速、 等于额定风速和大于额定风速的海况,考虑风机 正常运转和风机停机顺桨2种状态;海况4为风 机自存工况,风机处于停机状态。海况1~3的模 拟结果用于分析系泊受到的疲劳损伤情况,海况 2~4的模拟结果用于对比分析系泊最大张力的变 化情况。各海况参数根据文献[17]得到的 Buoy Cabo Silleiro 海域风浪联合分布数据选取。

表 2 环境海况

回扣供太	谱峰周期	有义波高	湍流强度	平均风速	海
入的心态	$T_{ m p}/ m s$	$H_{\rm s}/{ m m}$	Ι	U/(m/s)	况
运转/停机	8.0	2.0	0.26	4.0	1
运转/停机	13.0	5.0	0.15	11.4	2
运转/停机	12.4	6.3	0.12	23.0	3
停机	10.3	8.0	0.11	28.3	4

两种形式的风机系泊系统均由3根悬链线系 泊组成。由于结构的对称性,选取其中的系泊线 2为研究对象。如图3所示,对于不同的环境海 况,考虑两种风浪夹角变化情况。一种为波浪荷 载作用方向和系泊线2共线,从0°~90°改变风荷 载的作用方向;另一种为风荷载作用方向与系泊 线2共线,从0°~90°改变波浪荷载的作用方向。 对于更大的风浪夹角,由于其发生的概率非常小, 因此不予考虑。



#### 图 3 风浪夹角示意

为获得各种工况下系泊的疲劳损伤情况,根据API-RP-2SK规范建议,每种工况选取不同的随机种子生成湍流风场与随机波浪,进行10次3h时域模拟,并将10次模拟得到的系泊每小时疲劳损伤取平均值进行对比分析。

### 3 结果分析

#### 3.1 平台运动响应分析

平台的运动响应对系泊张力的影响十分关 键。以半潜式风机在海况2下的纵荡运动响应为 例进行频域分析并进行说明。当波浪方向不变而 风向变化时各工况下的纵荡响应功率谱如图4所 示;风向不变而波浪方向改变时各工况下的结果 与图4类似,此处不再赘述。图4a所示风机运转 状态下,当风向角度从0°度到90°变化时,平台纵 荡自振频率0.0087 Hz 附近响应峰值增大;图4b 所示风机停机状态下,纵荡运动的功率谱则随风 向的改变基本保持不变。这说明风机停机顺桨 时 纵荡方向的气动阻尼随风向的变化无明显变 化;而风机运转时,随风向角度增大,纵荡方向的 气动阻尼减小,从而导致纵荡运动响应峰值增大。



#### 图 4 风向变化时半潜式风机平台纵荡频域分析

此外 随风向角度增大,纵荡响应谱中0.05~0.15 Hz的波频部分基本不变。这是因为阻尼主要对 结构自振频率附近的振动有较大影响<sup>[18]</sup>,而波频 运动的频率区间远大于纵荡自振频率,故气动阻 尼对其影响很小<sup>[19]</sup>。

图 5 所示为各工况下风浪夹角变化时,平台 纵荡与艏摇运动响应最大值的变化情况。风机运 转状态下风浪夹角增大时,以及风机停机状态下, 风向固定而波浪作用方向角度增大时,风机平台 的纵荡运动响应最大值均减小;风机停机状态下, 波浪作用方向固定而风向角度增大时,平台的纵 荡响应最大值则基本保持不变。平台的纵摇运动 变化趋势与纵荡运动变化趋势相似。以上现象的 产生是因为在风机运转时,随风浪夹角增大,纵荡 与纵摇方向上气动阻尼减小,但是同时风荷载激 励也减小,因此纵荡与纵摇响应仍然减小。风机 停机顺桨时,气动荷载较小,平台受到的荷载主要 是波浪荷载,纵荡与纵摇运动只随波浪荷载作用 方向变化而变化。

半潜式浮式风机的艏摇运动在风向为 0°,波 浪作用方向为 30°与 90°时达到最大,且在风机停 机状态下,艏摇运动响应对波浪荷载作用方向的 变化更敏感。这是因为艏摇方向上的气动阻尼在 风机停机时较小,在风机运转时较大,因此风机停 机时,艏摇运动对风浪夹角变化更敏感。而单柱 式风机因为采用了系泊三角连接结构,艏摇刚度 很大,不同工况下的艏摇响应都较小。此外,平台 的垂荡运动主要是波频运动,受风浪夹角变化的 影响较小,风浪夹角变化时,垂荡运动无显著变 化,此处不再给出其变化趋势图。



#### 3.2 系泊最大张力与疲劳损伤

通过耦合模拟并提取结果,得到各工况下系 泊线 2 的最大张力,图 6 为其变化曲线。可以看 到,风机运转时,对于两种形式的浮式风机,系泊 的最大张力都在风浪共线时最大;在风机停机状 态下,风向固定而波浪作用方向角度增大时,风机 系泊的最大张力减小,波浪作用方向固定而风向 变化时,系泊的最大张力则基本保持不变。

对于系泊在各工况下受到的疲劳损伤,通过 10次随机模拟得到系泊线2的张力时程,采用雨



流计数法对系泊线张力时程进行统计得到应力幅 谱,再根据 Palmgren-Miner 线性损伤累积理论得 到系泊的每小时疲劳损伤,并与系泊的 T-N 曲线 对比。系泊的 T-N 曲线根据 API-RP-2SK 规范选 取参数:

$$NR^M = K \tag{1}$$

式中: *N* 为循环次数; *R* 为张力范围 *T* 与断裂强度的比值; *M*、*K* 为 T-N 曲线参数 ,根据规范取 *M* = 3 *K* = 1000。



图 6 系泊线 2 最大张力

图 7 所示为不同工况下系泊线 2 的每小时疲劳损伤。风机运转时,各海况下的系泊疲劳损伤 均随风浪夹角的增大而减小;风机停机时,波浪作



用方向固定而风向角度增大,海况1和海况2下 系泊的疲劳损伤也随之增大,海况3下系泊的疲 劳损伤则略有减小。





表 3 列出了风机停机时,对比风浪共线工 况,风浪不共线工况造成的系泊张力标准差与系 泊疲劳损伤增大的百分比。可以看到,海况1与 海况2下,系泊张力标准差随风向角度的增大而 增大。这说明风向角度增大时,系泊张力幅值增 大,从而导致了系泊疲劳损伤增大。从海况1~ 3,海况越恶劣,系泊疲劳损伤在风浪不共线工 况下增大的百分比越小,说明温和海况下,不共 线风浪对系泊疲劳损伤的影响更大。海况1中, 风浪夹角为90°的工况对半潜式风机系泊疲劳损 伤的增加可达到 5.9%,对单柱式风机系泊疲劳 损伤的增加可达到 9.8%。参考规范 DNV-RP-C205 中提供的用于疲劳寿命评估的海况散布表, 波浪波高小于海况 1 中波高(H<sub>s</sub>=2 m)的温和 海况出现概率可达到 25%以上。部分温和海况 下,风速小于风机切入风速,风轮不转动;风速 大于切入风速时,由于电网调峰等缘故,风机也 可能处于停机状态。可见在进行系泊疲劳损伤分 析时,不共线风浪造成的系泊疲劳损伤增加不容 忽视。

表 3 不共线风浪造成的疲劳损伤增大情况

%

风荷载作用− 角度/( °)  −	系泊张力标准差					系泊疲劳损伤						
	OC4-DeepCwind		OC3-Hywind		OC4-DeepCwind			OC3-Hywind				
	海况1	海况 2	海况 3	海况1	海况 2	海况 3	海况1	海况 2	海况 3	海况1	海况 2	海况 3
30	0.2	0.0	-0.2	0.4	0.6	0.0	0.6	0.3	-4.3	1.2	1.0	0.0
60	0.7	0.1	-0.2	1.5	1.8	-0.9	2.9	0.8	-4.3	4.8	4.0	0.0
90	1.5	0.8	-0.3	3.0	2.6	-1.6	5.9	2.2	-4.6	9.8	8.1	-0.1

## 4 结 论

本文研究了在风浪联合作用情况下,风浪夹 角变化对海上浮式风机平台的运动响应、系泊的 最大张力和系泊疲劳损伤的影响。通过对4种具 有代表性的海况进行时域模拟,获得了半潜式与 单柱式浮式风机的动力响应,得到以下结论:

(1)风浪共线作用下,风机平台除艏摇外其 他自由度上的响应均达到最大,系泊张力也达到 最大;而在温和海况下,风机停机时不共线风浪会 造成更大的系泊疲劳损伤,尤其风浪夹角为90° 时,系泊的疲劳损伤增大显著。

(2) 基于研究结果,建议对于采用悬链式系 泊的半潜式与单柱式浮式风机,在计算除艏摇外 的平台运动响应以及进行系泊的极限承载力设计 时,可以只考虑风浪共线的工况;在评估温和海况 下系泊的疲劳损伤时,至少考虑风机停机状态下 风浪夹角为0°,90°两种工况;在系泊的疲劳寿命 评估中,应结合风浪作用方向散布图,考虑温和海 况下的风浪不共线工况。

#### 参考文献

- [1] 胡 军,唐友刚,阮胜福.海上风力发电浮式基础的研究进展及关键技术问题[J].船舶工程,2012, 34(2):91-95.
- [2] 邓 露, 王 彪, 肖志颖, 等. 半潜型浮式风机平 台研究综述[J]. 船舶工程, 2016, 38(4): 1-6.
- [3] Yu Q , Chen X. Floating Wind Turbines [R]. Texas: American Bureau of Shipping (ABS) , 2012.
- [4] Fischer T, Rainey P, Bossanyi E, et al. Study on control concepts suitable for mitigation of loads from misaligned wind and waves on offshore wind turbines supported on monopiles [J]. Wind Engineering, 2011, 35 (5): 561–574.
- [5] DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Stru-ctures [S].
- [6] 夏 露. 海上风机基础在风浪作用下的动力分析与 疲劳分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [7] 乔东生,欧进萍.深水悬链复合锚泊线疲劳损伤计算[J].船舶力学,2012,16(4):422-432.

[8] DNV-OS-J103, Design of Floating Wind Turbine Stru-ctures [S].

- [9] Philippe M, Babarit A, Ferrant P. Modes of response of an offshore wind turbine with directional wind and waves [J]. Renewable Energy, 2013, 49: 151–155.
- [10] Barj L, Stewart S, Stewart G, et al. Wind Wave Misalignment in the Loads Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory(NREL), 2014.
- [11] Bachynski E E , Kvittem M I , Luan C , et al. Windwave misalignment effects on floating wind turbines: Motions and tower load effects [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering , 2014 , 136: 041902–1–12.
- [12] Robertson A, Jonkman J, Vorpahl F, et al. Offshore Code Comparison Collaboration Continuation Within IEA Wind Task 30: Phase II Results Regarding a Floating Semisubmersible Wind System [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2014.
- [13] Robertson A, Jonkman J, Masciola M, et al. Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4 [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory(NREL), 2014.
- [14] Jonkman J. Definition of the Floating System for Phase IV of OC3[R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory(NREL), 2010.
- [15] Jonkman J , Butterfield S , Musial W , et al. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory(NREL) , 2009.
- [16] Kelley N D , Jonkman B J. Overview of the TurbSim Stochastic Inflow Turbulence Simulator [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory(NREL), 2006.
- [17] Li Lin , Gao Zhen , Moan T. Joint distribution of environmental condition at five european offshore sites for design of combined wind and wave energy devices [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering , 2015 , 137(3) , 031901–1–16.
- [18] 龙驭球,包世华.结构力学(上册)(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- [19] 邓 露,黄民希,肖志颖,等.考虑气动阻尼的浮 式风机频域响应分析[J].湖南大学学报(自然科 学版),2017,44(1):1-8.