

文章编号:1006-2467(2018)06-0743-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.06.016

气动荷载对浮式风机系泊疲劳寿命的影响分析

邓 露¹, 胡缤纷¹, 吴松熊¹, 黄民希², 宋晓萍³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 长沙 410082;
3. 湘电风能有限公司, 湖南 湘潭 411102)

摘 要: 利用仿真软件 FAST 和 OrcaFlex 建立了风机-浮式平台-系泊系统在时域上的耦合分析模型, 结合 Miner 线性损伤累积理论、雨流计算法和系泊 $T-N$ 曲线, 分析了浮式风机的系泊系统在不同气动模型和代表性工况下的疲劳问题, 研究了气动荷载和风场湍流强度对系泊疲劳寿命的影响。结果表明: 气动荷载会大幅缩短系泊的疲劳寿命, 考虑湍流气动荷载时的系泊疲劳寿命仅为不考虑其影响时的 $1/5$, 故在系泊疲劳分析中应合理选择湍流风模型; 当海况风速接近风机额定风速时, 气动荷载会显著增大平台水平位移, 导致系泊张力大幅增大, 加速系泊疲劳损伤, 缩短系泊疲劳寿命; 平台的侧移响应会增大平台的侧倾响应, 从而加速系泊的疲劳。

关键词: 浮式风机; 系泊疲劳分析; 气动荷载; 耦合分析模型

中图分类号: TK 89 **文献标志码:** A

Influence of Aerodynamic Load on Fatigue Life of Mooring Lines of Floating Wind Turbines

DENG Lu¹, HU Binfen¹, WU Songxiong¹, HUANG Minxi², SONG Xiaoping³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd.,
Changsha 410082, China; 3. XEMC Windpower Co., Ltd., Xiangtan 411102, Hunan, China)

Abstract: Based on a coupled analytical model of floating wind turbine, an investigation into the influences of aerodynamic load and wind turbulence intensity on the fatigue life of mooring lines was performed by using the Miner's cumulative damage theory, the rain flow method and the $T-N$ curves. The results of the fatigue analyses of mooring lines show that the including of the turbulent wind loads causes an 80% decrease in the fatigue life of mooring lines, indicating the importance of choosing a reasonable turbulent wind model; in sea states with wind speed which is close to the rated wind speed of the wind turbine, aerodynamic loads can greatly amplify the horizontal displacement of the platform, thus increase the tension of mooring lines, and decrease the fatigue life of mooring lines; the interaction among the responses can worsen the fatigue damage of mooring lines. This study can guide the fatigue design of mooring lines.

Key words: floating wind turbines; mooring line fatigue analysis; aerodynamic load; coupled analysis model

收稿日期: 2017-01-20

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划(2013AA050603), 湖湘青年科技创新创业平台资助项目

作者简介: 邓 露(1984-), 男, 湖南省双峰县人, 教授, 主要从事海洋结构的概念设计、振动、安全评估等方面的研究。

E-mail: denglu@hnu.edu.cn.

近年来,浮式风机在深水海域风能开发中备受关注.作为浮式风机平台的定位构件,系泊系统在 20 年服役期内要经历约 6 000 万次荷载循环,因此系泊的疲劳已成为浮式风机平台设计考虑的关键因素^[1].

浮体慢漂运动引起的低频系泊张力对系泊的疲劳寿命影响显著^[2-3].传统海洋平台的低频运动主要由波浪二阶差频力引起^[4-5],而浮式风机平台还受气动荷载的影响.一个 5 MW 风机以额定风速运行时产生的气动荷载可达 700 kN,对系泊疲劳寿命的影响不可忽略^[6].然而,虽然目前二阶差频力对浮式风机系泊的影响已被广泛关注^[7-10],却鲜有研究涉及气动荷载对浮式风机系泊的影响^[11].此外,湍流强度作为国际电工委员会(IEC)规范中定义风机等级的重要参数^[12],会间接影响气动荷载的波动程度,但系泊设计规范 DNV-OS-E301 在进行系泊疲劳分析时采用的挪威石油管理局(NPD)和 ISO 脉动风谱均未包含与湍流强度相关的项^[3,13].

针对以上现状,本文利用仿真软件 FAST 和 OrcaFlex 建立了浮式风机的耦合分析模型,并以美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)提出的 5 MW 风机和 OC4-DeepCwind 浮式平台为研究对象,对其系泊系统展开了研究.根据不同的波高和风场湍流强度设置了 6 种时域分析工况,并得到了各工况下系泊的张力时程^[7].利用 Miner 线性损伤累积理论、雨流计算法和系泊 $T-N$ 曲线,计算了各分析工况下系泊的疲劳寿命并进行了对比,分析了气动荷载及风场的湍流强度对系泊疲劳寿命的影响.

1 环境荷载的模拟

1.1 外部风场及气动荷载

按风速是否随时间变化,外部风场可分为稳态风场和湍流风场.稳态风场风速恒定,仅考虑垂直方向的风剪切效应.湍流风场可在稳态风场基础上叠加脉动风速生成,其中脉动风速可用 Kaimal 或 Von Karman 等功率谱描述.本文采用标准湍流模型和 Kaimal 谱模拟湍流风场^[12],风场利用前处理程序 Turbsim 生成.

作用在风轮上的气动荷载是风力机的主要动力来源.为计算气动荷载,先计算风轮平面处的诱导速度,确定叶素截面的相对风速和攻角后,再利用翼型空气动力学系数计算作用于各叶片截面上的气动荷载^[14].

1.2 随机波浪与水动力荷载

利用线性随机波理论,选用 JONSWAP 谱生成随机波浪.计算水动力荷载时,先通过软件 Genie 建立浮式风机平台的数值模型,随后导入软件 HydroD 中计算水动力系数,包括一阶波激力的幅频响应算子、二阶差频力的二次传递函数等.最后将所得系数输入 OrcaFlex 中计算随机波作用下的水动力荷载.

1.3 风浪对应关系

JONSWAP 谱的风浪对应关系由 GL 规范确定^[15].外部风场的风速持续时间 θ 和吹送距离 ξ 分别为

$$\theta = \frac{gt}{u_{10}} \quad (1)$$

$$\xi = \frac{gx}{(u_{10})^2} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度; t 为风暴的持续时间; u_{10} 为距海平面 10 m 处的平均风速值; x 为吹送距离.

波浪谱的峰值频率 ω 为

$$\omega = \frac{\omega_p u_{10}}{2\pi g} = \max\{0.16, 2.84\xi^{-0.3}, 16.8\theta^{\frac{3}{7}}\} \quad (3)$$

利用上式求得的 ω ,可得波浪谱的峰值周期 T_p 和有义波高 $H_{s,j,w}$ 分别为

$$T_p = \frac{u_{10}}{g} \frac{1}{\omega} \quad (4)$$

$$H_{s,j,w} = 0.009 4\omega^{-\frac{5}{3}} \frac{u^2}{g} \quad (5)$$

2 系泊疲劳寿命计算方法

2.1 系泊的 $T-N$ 曲线

$T-N$ 曲线给出了特定张力范围 T 循环作用下,系泊发生疲劳破坏所需加载次数 N 与 T 的关系,

$$NR^M = K \quad (6)$$

式中: R 为 T 与最小破断力(MBS)的比值; M 、 K 为系泊疲劳参数,按规范取值^[2].

2.2 系泊疲劳寿命计算

对所设工况进行时域分析,得到系泊的张力时程.利用雨流计数法,结合 Palmgren-Miner 损伤累积理论和 $T-N$ 曲线,可得海况 j 下系泊的年累积疲劳损伤 D_j .

文中疲劳安全系数 f_a 取为 3^[2],系泊疲劳寿命 L 采用下式计算

$$L = 1/(f_a \sum_j D_j) \quad (7)$$

3 分析模型及分析工况设置

3.1 实时耦合分析软件

FAST 是 NREL 开发的风力机时域气弹耦合程序,能模拟风力机的空气动力、控制系统和结构动力响应等. OrcaFlex 是英国的 Orcina 公司开发的建模软件,能对平台的系泊系统及浮体精细建模,并计算平台和系泊的水动力荷载和动力响应.

FAST 和 OrcaFlex 的耦合计算通过动态数据实时传输链接 FASTLink 实现. FAST 模拟风力机,读取 Turbsim 生成的风场,考虑弹性变形和控制系统的影晌后算出气动荷载,并将平台位移、速度及加速度等通过 FASTLink 传递给 OrcaFlex. OrcaFlex 模拟风机平台及系泊,利用 FAST 和 HydroD 传递的数据计算平台的水动力荷载和系泊对平台的合力,再将结果由 FASTLink 传递给 FAST,作为其计算风力机下一时刻动力响应的部分输入,从而实现风力机、浮式平台和系泊系统的实时耦合计算.

3.2 计算模型

风轮-机舱体系选自 NREL 提出的 5 MW 风机^[16],塔筒和控制系统来自 NREL 提出的 OC3-Hywind 模型^[17],风机主要参数:额定功率为 5 MW;控制方式为变速、变桨;风轮直径为 126 m,轮毂高度为 90 m;塔顶及塔筒质量分别为 350 和 247 t;切入、额定和切出风速分别为 3、11.4 和 25 m/s;切入和额定转速分别为 6.9 和 12.1 r/min. 浮式平台选取 NREL 提出的半潜型 OC4-DeepCwind 模型^[18],主要参数见表 1,数值模型简图如图 1 左侧所示.

目标海域水深取 120 m,平台系泊采用 3 根互为 120° 的悬链线,如图 1 右侧所示. 悬链线选择有档锚链 R3,具体参数由美国石油协会(API)规范确定^[2]:公称直径为 76.6 mm, $M=3, K=1000$,最小

表 1 平台主要参数

Tab. 1 Main parameters of the platform

参数	数值	平台自由度	固有频率/Hz
浮筒中心距/m	28.87	纵荡	0.007 5
重心高度(距浮筒底部)/m	6.54	横荡	0.007 6
导缆孔高度(距浮筒底)/m	32	垂荡	0.046 3
浮筒高度,吃水深度/m	32;20	横摇	0.033 1
浮筒及压水板直径/m	12;24	纵摇	0.033 7
排水量(包括风机)/t	14 260	艏摇	0.010 8

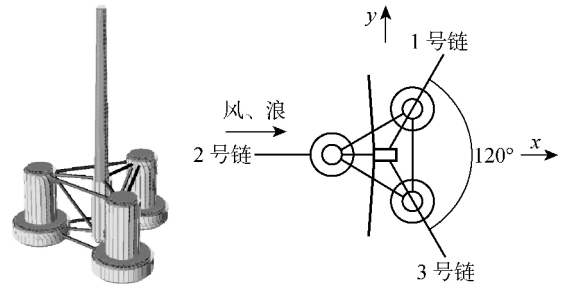


图 1 半潜型平台数值模型及其系泊平面布置图

Fig. 1 Numerical model and Mooring chains layout of the semi-submersible platform

断裂强度 5 123 kN,锚链湿重量为 108.63 kg/m,锚链长度 835.5 m,预张力 1 010 kN. 将相关参数代入式(6),便可确定计算所采用的 $T-N$ 曲线.

3.3 分析工况设置

海况散布表选自南海某海域^[19],将长期海况等效为 11 个典型短期海况^[20],如表 2 所示. 表中列出了各短期海况中的有义波高 H_s 、平均跨零周期 T_z 、轮毂高度处平均风速 \bar{u}_{hub} 及该海况出现的概率 p . 假定各海况中风、浪共向且均沿 X 轴正方向入射,风机无偏航.

表 2 短期海况的环境参数

Tab. 2 Environmental parameters in short-term sea states

短期海况	H_s/m	T_z/s	$\bar{u}_{hub}/(m \cdot s^{-1})$	$p/\%$
1	0.25	2.1	4.8	1.24
2	0.50	4.2	6.7	4.34
3	1.00	4.8	9.5	36.80
4	2.00	5.6	13.5	31.98
5	3.00	6.1	16.5	15.97
6	4.00	6.3	19.0	5.76
7	5.00	6.4	21.3	2.32
8	6.00	7.0	23.4	1.16
9	7.00	7.2	25.2	0.31
10	8.00	7.6	27.0	0.11
11	9.00	8.0	28.6	0.01

分析时每个海况均设置了 6 种工况,如表 3 所示. 为保证精度,每个工况都利用 12 个湍流风-波浪随机种子计算后取疲劳分析的平均值作为结果. 工况 1~3 采用随机波浪和湍流强度(I)为 0.16、0.14 和 0.12 的 3 种风场分别组合^[12];工况 4 风场湍流强度为 0.14,波高设为零;工况 5 中风速设为零,模拟无风工况;工况 6 采用随机波浪和湍流强度为零的稳态风组合.

表 3 分析工况
Tab. 3 Analytical cases

分析工况	气动荷载设置	波浪荷载设置
1	湍流风, $I_A=0.16$	随机波浪
2	湍流风, $I_B=0.14$	随机波浪
3	湍流风, $I_C=0.12$	随机波浪
4	湍流风, $I_B=0.14$	静水条件
5	无风	随机波浪
6	稳态风	随机波浪

4 结果计算与分析

4.1 系泊疲劳寿命对比

通过 OrcaFlex 中系泊疲劳分析后处理模块, 算得各工况下各系泊锚链的疲劳寿命, 见表 4。

由表 4 可知, 2 号链为最不利系泊链。分析 2 号链的疲劳寿命可知: 仅考虑波浪荷载(工况 5)的疲劳寿命是仅考虑湍流气动荷载(工况 4)的 2 倍, 是同时考虑相同湍流气动荷载和波浪荷载时(工况 2)

表 4 各工况下的系泊疲劳寿命(年)

Tab. 4 Fatigue life of mooring line in each coupling case (years)

分析工况	1 号链	2 号链	3 号链
1	33.56	1.10	32.45
2	38.93	1.33	40.20
3	39.43	1.28	38.20
4	71.77	2.59	63.18
5	33.52	5.38	32.19
6	59.98	2.76	89.26

疲劳寿命的 4 倍。说明在浮式风机平台的系泊疲劳分析中, 气动荷载不可忽略, 且比波浪荷载的影响更为显著。

同时, 对比 2 号链在工况 1、2、3 和工况 6 的疲劳寿命可知, 考虑湍流气动荷载的疲劳寿命(工况 1、2、3)仅为考虑稳态气动荷载(工况 6)的 1/2。实际上, 湍流风模型更贴合真实海况。因此, 进行系泊疲劳设计时须选择恰当的脉动风谱并根据具体场地环境来确定湍流强度。

4.2 气动荷载影响分析

分析平台在其 6 个自由度上的响应时程曲线可知, 其水平方向上的响应, 特别是纵荡, 受气动荷载影响最大, 故以外风速最接近风机额定风速的 4 号海况($H_s=2\text{ m}$, $T_z=5.6\text{ s}$, $\bar{u}_{\text{hub}}=13.5\text{ m/s}$)为例, 对平台的纵荡位移响应进行分析。图 2 和图 3 分别给出了该海况下平台纵荡位移的时程曲线和响应谱以及该海况下 2 号链导缆孔端有效张力的时程曲线和响应谱(仅给出部分时程便于识图)。

由图 2 和图 3 可知, 工况 1 中平台的纵荡位移响应幅值远大于工况 5 和工况 6, 且 3 个工况的位移响应谱中主要的低频成分和峰值频率基本一致; 工况 1 中的张力变化幅值也明显大于工况 5 和工况 6, 且 3 个工况张力响应谱与位移响应谱的曲线形状和峰值频率几乎相同, 可推断平台的水平位移会直接影响导缆孔端的张力值。基于以上两点可知, 在湍流风作用下, 工况 1 中锚链的导缆孔端在平台的牵引下会随之做大幅低频水平往复运动, 引起系泊张力变化范围大幅增大, 故系泊单位时间内累积的疲劳损伤也随之大幅增加。

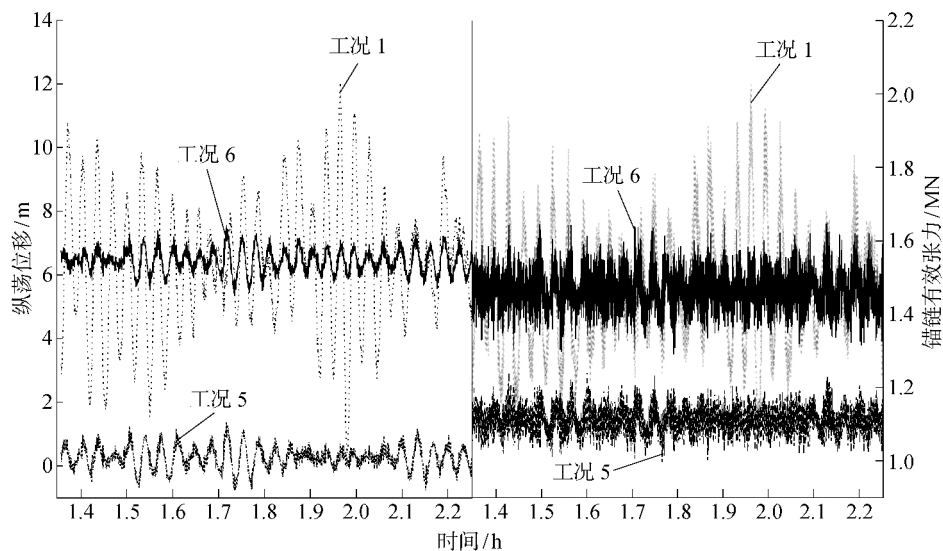


图 2 第 4 号海况中平台纵荡位移及 2 号链有效张力时程曲线

Fig. 2 Platform surge displacement and tensile force time-history analyses of Line 2 under the sea state 4

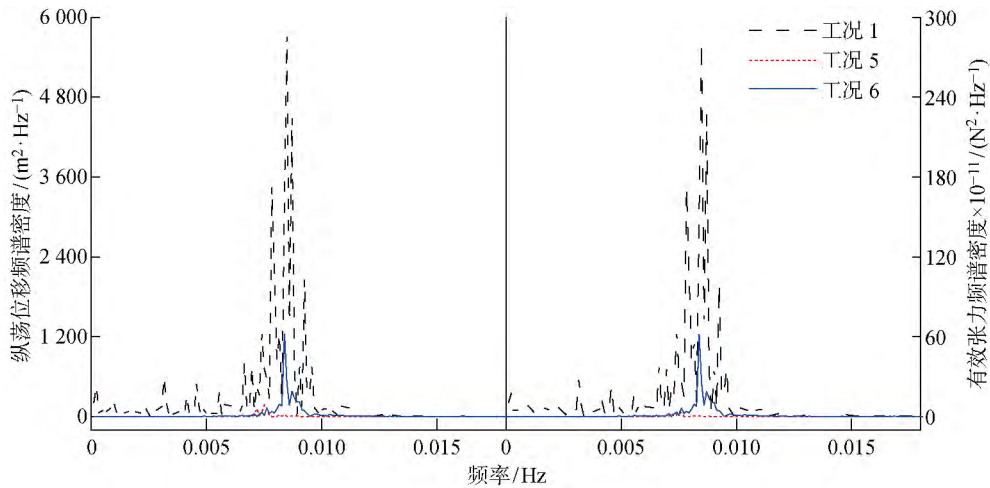


图 3 第 4 号海况中平台纵荡位移及 2 号链有效张力响应频谱

Fig. 3 Platform surge displacement and tensile force response spectra of Line 2 under the sea state 4

采用悬链线系泊的浮式平台水平运动的固有频率较低且主要受二阶差频力和气动荷载等低频力的影响^[3]. 因此,工况 1 和 6 作用下的浮式风机所受低频力主要为二阶差频力和气动荷载,而工况 5 的气动荷载始终为 0,此时平台所受低频力主要为二阶差频力.

经统计,工况 1、5 和 6 作用下纵荡方向二阶差频力与气动荷载的均值 μ 和标准差 σ 如图 4 所示. 由图 4 可知,除工况 5 中气动荷载始终为 0 外,工况 1、5、6 在各海况下的二阶差频力均值、标准差及气动荷载均值都基本一致,而 3 个工况间气动荷载的标准差相差较大. 结合图 2,可知气动荷载的幅值变化直接影响平台的纵荡运动,这也是湍流风作用下平台系泊疲劳寿命会大幅缩短的根本原因.

图 5 为 2 号链在各海况下的年疲劳损伤值. 由图可知,在额定风速附近(海况 4),系泊的年疲劳损伤值最大;在切出风速附近(海况 9),系泊的年疲劳损伤值下降幅度变大. 当海况 3~6 发生时,气动荷载标准差最大,引起系泊在单位时间内的疲劳损伤也最大. 同时,海况 3~6 的年发生概率之和大于 90%,会引起系泊累积疲劳损伤大幅增加,疲劳寿命大幅缩短.

4.3 水平响应间关系分析

图 6 所示为在海况 4 中作用工况为 5 或 6 时,平台在纵摇方向上的位移频谱图. 由图可知,工况 5 中,低频区的纵摇响应几乎全集中在其固有频率 0.033 Hz 附近;而工况 6 中,纵摇响应还在纵荡响应的固有频率 0.007 7 Hz 处有一小波峰.

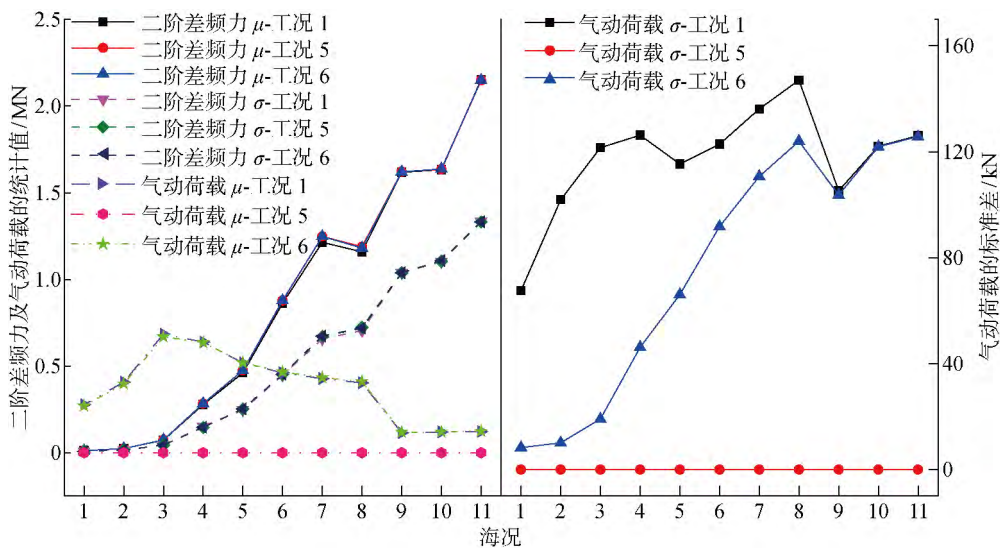


图 4 工况 1、5、6 下的平台二阶差频力及气动荷载统计值

Fig. 4 The statistics of second-order difference-frequency forces and aerodynamic loads under Case 1, 5, and 6

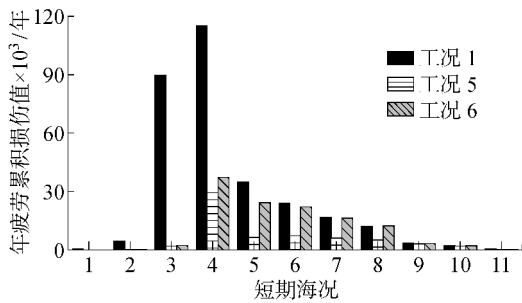


图5 各海况下的2号悬链线年疲劳损伤值

Fig. 5 Annual cumulative fatigue damage of Line 2 in each sea state

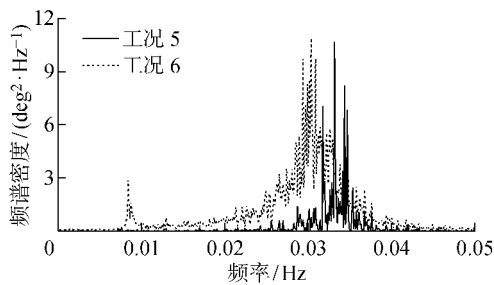


图6 第4号海况中平台在纵摇方向上的频谱图

Fig. 6 Frequency spectra of platform pitch motion under the sea state 4

浮式风机平台的重心一般低于海平面,故平台在海平面上的纵荡位移会引发纵摇方向的偏心弯矩,从而产生纵摇;类似地,平台的横荡位移也会引起其横摇方向上的偏心弯矩.在工况6下,因为平台纵荡响应的均值和标准差大幅增加,故引起平台的纵摇响应在纵荡响应的固有频率处出现一个明显的波峰.平台水平方向上的横荡、纵荡响应会分别引起垂直方向上横摇、纵摇的部分响应,导致系泊的疲劳损伤增大,系泊疲劳寿命随之缩短.

5 结论

本文建立了浮式风机的风浪耦合分析模型,通过时域分析计算了不同分析工况下某浮式风机平台模型系泊的疲劳寿命,得到以下结论:

(1) 气动荷载会明显降低系泊的疲劳寿命,故系泊疲劳分析中须采用气动模型计算外部荷载.此外,湍流强度是决定气动荷载对系泊疲劳寿命影响程度的重要因素,疲劳分析时应由真实海况合理确定湍流强度.

(2) 采用湍流风模型计算气动荷载时,在风速接近风力机额定风速的海况,系泊的年疲劳累积损伤大幅增大,系泊寿命会明显缩短,此时气动荷载成为浮式风机系泊疲劳寿命的控制荷载.

(3) 浮式风机平台在水平方向上的响应受风机气动荷载的影响最大,而平台水平方向上的横荡、横摇响应会分别引发平台垂直方向上横摇、纵摇的部分响应,导致系泊疲劳加速,系泊疲劳寿命缩短.

参考文献:

- [1] 单桂敏. 新型深水系泊系统疲劳破坏分析[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2010.
SHAN Guimin. Fatigue failure analysis of a new-type of deepwater mooring systems[D]. Tianjing: Tianjin University, 2010.
- [2] INSTITUTE A P. Recommended practice for design and analysis of stationkeeping systems for floating structures; Exploration and production department. API Recommended Practice 2SK (RP 2SK)[S]. 3th ed. USA: American Petroleum Institute, 2005: 83.
- [3] VERITAS D N. Offshore Standard DNV-OS-E301; Position Mooring [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2008: 152.
- [4] 宋宪仓, 王树青, 杜君峰. 二阶差频力对半潜式平台系泊锚链疲劳损伤影响[C]// 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 南宁: 中国海洋工程学会, 2015: 292-297.
SONG Xiancang, WANG Shuqing, DU Junfeng. Effects of second-order hydrodynamic forces on fatigue damage of mooring lines of semi-submersible platforms[C]// *Proceedings of the 17th Symposium of China Ocean (Coast) Engineering (Volume 1)*, 2015: 292-297.
- [5] 康海贵, 田茂金, 龙丽吉, 等. 基于谱分析方法的海上风机支撑结构疲劳寿命分析[J]. 可再生能源, 2013, 31(7): 41-44.
KANG Haigui, TIAN Maojin, LONG Liji, *et al.* Spectral-based fatigue analysis of support structure for offshore turbines [J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(7): 41-44.
- [6] 莫继华, 何炎平, 李勇刚, 等. 近海风电机组单桩式支撑结构疲劳分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(4): 565-569.
MO Jihua, HE Yanping, LI Yonggang, *et al.* Fatigue analysis of offshore wind turbine mono-pile support structure[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2011, 45(4): 565-569.
- [7] VERITAS D N. Design of offshore wind turbine structures; DNV-OS-J101 [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2010: 265.
- [8] VERITAS D N. Environmental conditions and environmental loads; DNV-RP-C205[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2010: 138.

- [9] FALTINSEN O. Sea loads on ships and offshore structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [10] 王佳颖, 张世联, 徐伟, 等. 超期服务浮式平台锚链疲劳寿命安全评估[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(11): 1888-1891.
WANG Jiaying, ZHANG Shilian, XU Wei, *et al.* Safety assessment for fatigue life of floating platform mooring [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2008, 42(11): 1888-1891.
- [11] BAYATI I, JONKMAN J, ROBERTSON A, *et al.* The effects of second-order hydrodynamics on a semisubmersible floating offshore wind turbine[C]// **Journal of Physics: Conference Series**. Copenhagen: IOP Publishing Ltd., 2014: 012094.
- [12] COMMISSION I E. Design requirements for offshore wind turbines: IEC 61400-3[S]. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2009: 144.
- [13] VERITAS D N. Design of floating wind turbine structures; DNV-OS-J103 [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2013: 57.
- [14] MORIARTY P J, HANSEN A C. AeroDyn theory manual[M]. Denver: Citeseer, 2005.
- [15] WIND GL. Guideline for certification of offshore wind turbines[S]. Berlin: GL Renewables Certification, 2005: 97.
- [16] JONKMAN J M, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, *et al.* Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [R]. NREL/TP-500-38060, Denver: NREL, 2009.
- [17] JONKMAN J M. Definition of the floating system for phase IV of OC3 [R]. NREL/TP-500-47535, Denver: NREL, 2010.
- [18] ROBERTSON A, JONKMAN J, MASCIOLA M, *et al.* Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4 [R]. NREL/TP-5000-60601, Denver: NREL, 2014.
- [19] 周楠, 刘波, 张阳, 等. 内转塔式 FPSO 系泊系统疲劳分析研究[C]// 第三届中国海洋工程技术年会论文集. 宁波: 中国海洋工程学会, 2014: 247-252.
ZHOU Nan, LIU Bo, ZHANG Yang, *et al.* Fatigue analysis on mooring systems of internal turret FPSO [C]// **Proceedings of the 3rd Annual Meeting of China Ocean Engineering and Technology**. Ningbo: China Marine Engineering Society, 2014: 247-252.
- [20] 盛振国, 任慧龙, 甄春博, 等. 基于时域载荷的海上风机基础结构疲劳分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4): 96-100.
SHENG Zhenguo, REN Huilong, ZHEN Chunbo, *et al.* Fatigue analysis for offshore wind turbine[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition**, 2014, 42(4): 96-100.