

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.002

# 南海海况下半潜浮式风机在故障工况下的动力学响应分析

施伟<sup>1,2,3,4</sup>, 郑侃<sup>5</sup>, 任年鑫<sup>1,3</sup>

- (1. 大连理工大学 深海工程研究中心, 大连 116024; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;  
3. 大连理工大学 海洋能研究中心, 大连 116024; 4. 大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 大连 116024;  
5. 明阳智慧能源集团股份有限公司, 中山 528437)

**摘要:** [目的]作为新型清洁可再生能源, 风力发电的发展备受瞩目。随着风力发电由陆上向海洋发展, 海上浮式风电发展迅速。[方法]以南海海况下半潜浮式风机为研究背景, 采用 ANSYS-AQWA 分析软件, 对浮式风机在南海典型海况下的动力学响应进行了分析。采用等效载荷法模拟空气动力荷载, 采用势流理论计算水动力荷载和系泊系统的锚链荷载。[结果]研究表明: 当单根锚链发生断裂时, 浮式风机的纵荡和运动会大幅增加, 可能会引起平台失控。当两根锚链断裂时, 在一定时间内, 运动响应会适当增加。因此建议采用冗余系泊系统, 即单组多根锚链, 从而在单根锚链失效后为更换锚链赢取时间。[结论]研究成果为我国深海浮式风电的开发提供了一定的参考。对于舱室破损工况的破损机理及数值模拟方法, 有待进一步的研究。

**关键词:** 海上风电; 浮式风机; 故障工况; 动力学响应; 锚链力

中图分类号: TM614; P742

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0012-09

## Dynamic Analysis of Semi-type Floating Offshore Wind Turbine with Failure Conditions Under Metocean Conditions in South China Sea

SHI Wei<sup>1,2,3,4</sup>, ZHENG Kan<sup>1</sup>, REN Nianxin<sup>1,3</sup>

- (1. Deepwater Engineering Research Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
3. Offshore Renewable Energy Research Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
4. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 5. Mingyang Smart Energy Group., Ltd., Zhongshan 528437, China)

**Abstract:** [Introduction] As a new type of clean and renewable energy, wind power attracts widely attention. With the development of wind power from land to sea, offshore floating wind power has developed rapidly. [Method] In this paper, the commercial software ANSYS-AQWA was used to numerically analyze the dynamic response of the OC4 DeepCwind semi-submersible floating wind turbine under typical sea condition of the South China Sea. The equivalent load method was used to calculate the aerodynamic loads, and potential flow theory was used to calculate the hydrodynamic loads on the platform and the mooring force on the mooring lines. [Results] The results shows the surge and motion response will increase significantly when one mooring line is lost. This may cause the loss control of the platform. When two mooring lines are lost, the motion response will increase appropriately during a certain time. Therefore, it is recommended to use redundant mooring system, i. g. several mooring lines in one group, to have enough time to replace the damaged mooring line. [Conclusion] This work provides a certain reference to the development of offshore wind power in deep water. Further research is needed to study the mechanism of flooded columns damaged and their numerical modeling methods.

**Key words:** offshore wind; floating wind turbine; fault conditions; dynamic responses; mooring forces

收稿日期: 2018-08-27 修回日期: 2018-09-13

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目“强非线性波作用下大型海上单桩式风机的动力学特性研究”(51709039); 国家自然科学基金青年基金项目“新型风-浪能装置集成结构系统的多体动力耦合效应研究”(51709040); 国家自然科学基金国际合作与交流项目“考虑可恢复性的浮式海上风机平台设计方法研究”(51761135011)

能源作为现代社会赖以生存的基石, 无时无刻不受到世界各国的高度重视。随着社会的发展和人民环保意识的增强, 清洁能源正被世界各国广泛地开发利用。风能作为清洁能源的重要组成部分, 正扮演着能源革命中的重要角色。海洋以其风力资源丰富且稳定等诸多优势, 正引领着风力发电之路由

陆上向海上逐渐延伸。根据海上风力机基础不同, 海上风机可分固定式海上风力机和浮式海上风力机。对此, 世界各国学者开展了深入的研究<sup>[1-4]</sup>。随着水深的增加, 固定式风力机在经济成本、结构强度等方面已经无法满足风电发展的需要, 而浮式风力机优势明显, 潜力巨大。针对深海风电的开发, 世界大型风电开发公司和科研院所提出了相应的浮式风力机概念模型, 并对其展开了相关的研究。

荷兰 GustoMSC 设计公司 Fons Huijs 等人<sup>[5]</sup>根据 GustoMSC 提出的 Tri-Floater 半潜式模型, 选用 NREL 5 MW 风机, 结合 ANSYS AQWA 和 PHATAS 软件来实现 Aero-Hydro-Servo-Elastic 仿真模拟, 模拟结果表明负荷结果良好。进一步研究, 证明了在初步设计的时候, 可以使用不耦合频域分析来作为评估整体波频运动的响应, 而无需实现全面耦合。挪威科技大学 (NTNU) Torgeir Moan 等人<sup>[6]</sup>利用 NREL 5 MW 风力机作为样机, 分别对陆基基础、SPAR 基础、TLP 基础和半潜式基础情况下, 风机传动系统的动态载荷和疲劳荷载作出了分析。同时, 挪威科技大学 Zhengshun Cheng<sup>[7]</sup>等人进一步研究了 OC4 半潜式浮式风力机在使用同装机容量水平轴风机 (HAWTs) 和垂直轴风机 (VAWTs) 时的极端结构响应和疲劳破坏状况, 并作出了对比分析。韩国庆尚大学 Thanh Toan Tran<sup>[8]</sup>选用 OC4 半潜式风机平台, 运用 CFD 方法和多体动力学方法, 对半潜式风机平台的动态耦合响应做出了分析。同时, 对时域内锚链线的回复力和回复力矩给出明确的数据。英国克兰菲尔德大学 (Cranfield University) Debora Cevalco 等人<sup>[9]</sup>在 OC4 半潜式基础上采用 5MW 达里厄垂直式 (Darrieus type) 风力机, 分析了两种锚链分析方法 (准静态法和集中质量法) 的计算结果, 并比较验证了两种方法的差异。

在最新的 DNV GL 有关浮式风机的规范中指出<sup>[10]</sup>, 锚链断裂等故障工况, 应该在设计工况中考虑。目前, 国内外对浮式风机锚链断裂、舱室破损等特殊故障工况还很少有研究。本文以 IEA Wind Task30 提出的浮式风机研究模型 OC4 DeepCwind 半潜式浮式风机为研究对象, 采用 ANSYS-AQWA 计算该浮式风机在故障工况下的运动响应和荷载分析。该型浮式风机适用于我国南海海域, 对解决沿海海域和岛礁海域用电问题有积极的意

义, 为我国建设成为海洋强国的战略目标提供一定的技术支持。

## 1 浮式风机设计

### 1.1 设计模型

本文研究对象为 OC4 DeepCwind 半潜式浮式风机<sup>[11]</sup>, 该风机采用美国可再生能源国家实验室 (NREL) 开发的 5 MW 风力机模型<sup>[12]</sup>, 如图 1 所示。

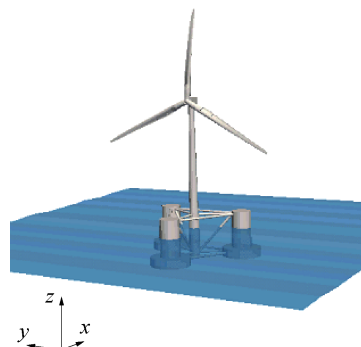


图 1 OC4 半潜式浮式风机系统

Fig. 1 OC4 DeepCwind floating wind turbine system

OC4 DeepCwind 半潜式浮式风机由风机机舱部分、塔架部分、浮式平台部分和锚链系统部分组成, 该型风机的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 浮式风机系统主要设计参数

Tab. 1 The main design parameters of OC4 DeepCwind wind turbine system

项 目	参 数
风机机型	NREL 5 MW
轮毂和机舱质量/t	350
塔架高度/m   质量/t	90   249.72
塔架直径顶部/m   底部/m	3.87   6.5
平台类型	OC4 DeepCwind
平台质量 (包含压舱水)/t	$1.3473 \times 10^4$
中立柱直径/m	6.5
上浮筒直径/m	12
下浮筒直径/m	24
横撑、斜撑直径/m	1.6
平台吃水深度/m	20
锚链长度/m	835.5

### 1.2 计算模型

本文采用 ANSYS-AQWA<sup>[13]</sup> 软件建立 OC4 DeepCwind 半潜式浮式风机系统数值模型, 如图 2 所示, 研究半潜浮式风机的运动响应。为使计算结果更加准确, 有必要对当前模型网格是否满足要求

做出判断。一般水动力计算软件通过采用哈斯金德 (Haskind) 关系来进行校验和比对所计算的模型网格。除此在外, 亦可采用多个网格数目不同的模型比对计算结果的收敛状况。本文采用对比近场法和远场法的二阶波浪力计算状况, 对计算模型网格质量进行判断。

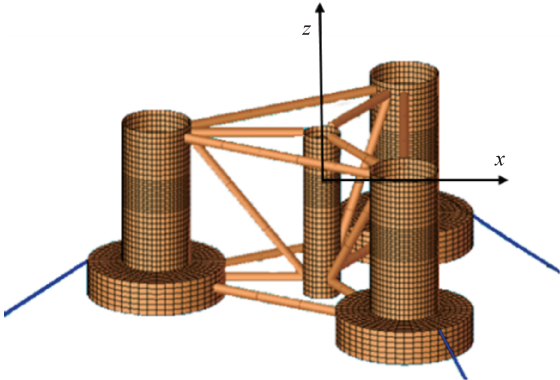


图2 OC4 DeepCwind 半潜式浮式风机水动力模型

Fig. 2 Hydrodynamic model of OC4 DeepCwind semi-submersible floating platform

近场法采用势流理论, 对湿单元 (Wet Element) 表面积分求解二阶定常力, 而远场法通过动量定理来求解二阶定常力且仅能计算纵荡、横荡和艏摇三个自由度的平均波浪力。近场法的计算依赖于计算网格数量, 一般情况下近场法计算有一定差距。当近场法与远场法计算结果趋势一致且误差不大时, 可近似认为水动力计算网格满足要求<sup>[8]</sup>。纵荡、横荡和艏摇方向近场法和远场法二阶定常波浪力对如图3~图5所示, 图线显示近场法和远场法计算结果趋势一致且误差较小, 说明模型网格划分符合计算要求。

### 1.3 风荷载计算

基于叶素理论和动量理论, 经典叶素-动量理论被广泛应用于风力机空气动力的载荷的工程计算。本文主要针对风力机系统的整体结构响应以及锚链力响应分析, 故拟采用风力机叶片等效简化荷载的方法进行风机系统空气动力部分的计算。OC4 DeepCwind 半潜式浮式风力机系统选用 NREL 5 MW 风力机, 根据 NREL 给出的该型风力机的风力-风速数据, 采用多项式函数拟合法, 生成连续的风力-风速拟合函数, 得到风力-风速函数图, 如图6所示。

海上风机为高耸结构, 其风荷载计算不同于海

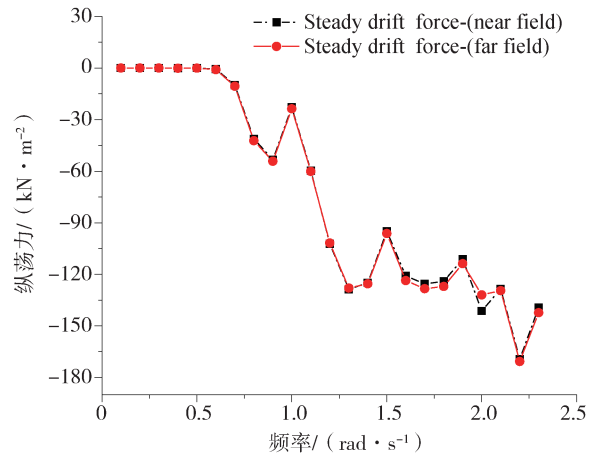


图3 纵荡方向二阶定常波浪力

Fig. 3 The steady drift force in surge

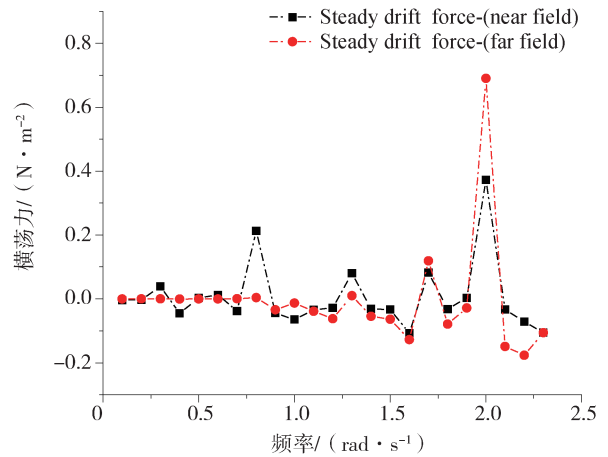


图4 横荡方向二阶定常波浪力

Fig. 4 The steady drift force in sway

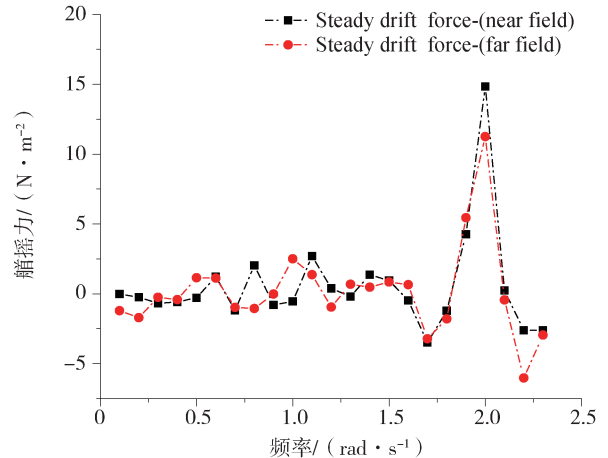


图5 艏摇方向二阶定常波浪力

Fig. 5 The steady drift force in yaw

洋平台。除了平台部分外, 还包括上部风机、叶片和塔筒的受力以及力矩作用。风机处于正常运行

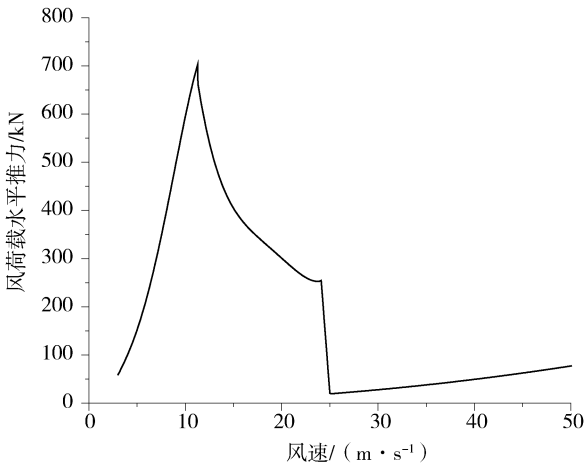


图 6 NREL 5 MW 风力机风荷载水平推力与风速曲线  
Fig. 6 Thrust force and wind speed relationship of NREL 5 MW wind turbine

下, 塔筒部分荷载为:

$$F_j = C_j(\theta)(u - u_s) |u - u_s| \quad (1)$$

浮式风机风荷载为:

$$F = \sum_{j=1}^n (F_j + T_j) \quad (2)$$

式中:  $F_j$  为  $j$  方向受力;  $C_j(\theta)$  为塔筒风力系数;  $u - u_s$  为相对风速;  $T_j$  为来风向风机及叶片受力。

## 2 设计工况

### 2.1 锚链断裂工况

OC4 DeepCwind 半潜式浮式风力机由 3 根悬链线进行锚泊固定, 悬链线之间的夹角为  $120^\circ$ , 如图 7 所示。

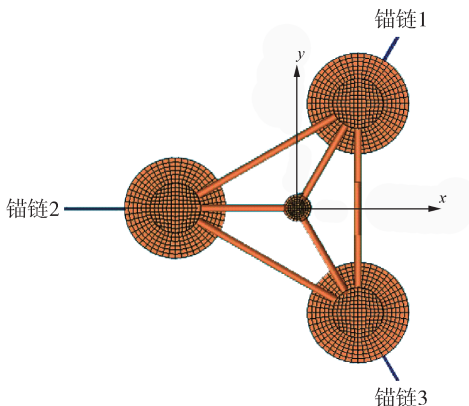


图 7 锚链布置平面图

Fig. 7 The configuration of mooring lines

在风浪海况的作用下, 悬链线承受了约束风机平台系统的荷载。假定一条或者多条悬链线发生断裂, 平台的运动将发生较大改变, 影响风机的正常

运行。根据实际情况, 现拟定锚链断裂故障工况如表 2 所示。

表 2 锚链断裂工况

Tab. 2 The working condition of mooring lines break

工况编号	锚链断裂工况
工况 1	正常完整状态
工况 2	1#锚链断裂
工况 3	3# & 1#锚链断裂

根据我国南海海域基本海况<sup>[14-19]</sup>, 选取一年一週南海某海域实际海况环境。选取不规则波波谱为 JONSWAP 谱, 谱峰因子  $\gamma = 3.3$ , 有义波高为 3 m, 波浪周期为 10 s, 设定模拟时间为 4 500 s, 设定风速为风机工作额定风速 11.4 m/s。模拟锚链断裂故障工况与正常完整工况对比结果如表 3 和图 8 所示。

表 3 锚链断裂工况六自由度运动响应对比分析表

Tab. 3 The comparison of 6-DOF motion response under the loss of mooring lines

运动方向/单位	数据类别	正常组	1#锚链断裂	3# & 1#锚链断裂
纵荡/m	均值	6.44	-7.30	-6.12
	方差	3.47	126.88	113.17
	最大值	11.77	11.14	11.14
	最小值	0.71	-36.73	-33.51
横荡/m	均值	0.09	-60.32	9.80
	方差	0.02	2 548.60	210.06
	最大值	0.43	0.42	43.51
	最小值	-0.26	-151.12	-8.49
垂荡/m	均值	-10.76	-10.31	-10.26
	方差	0.10	0.22	0.30
	最大值	-9.61	-9.02	-8.79
	最小值	-11.70	-11.65	-11.68
横摇/(°)	均值	0.00	0.18	0.03
	方差	0.00	0.63	0.04
	最大值	0.05	2.60	0.69
	最小值	-0.05	-1.83	-0.51
纵摇/(°)	均值	2.15	1.95	1.81
	方差	11.86	14.53	14.78
	最大值	13.55	14.23	14.10
	最小值	-10.03	-10.90	-11.40
艏摇/(°)	均值	0.00	-3.38	0.66
	方差	0.00	11.11	1.05
	最大值	0.01	0.66	3.31
	最小值	-0.01	-11.08	-1.00

在模拟真实海况环境下, 锚链断裂对风机系统运动响应影响明显。纵荡和横荡方向上, 相对于正常完整平台, 两种形式锚链断裂均出现了较大的位移。原因在于不对称的锚链分布, 无法为平台提供足够的锚链侧向约束力。平台在风浪作用下, 在纵

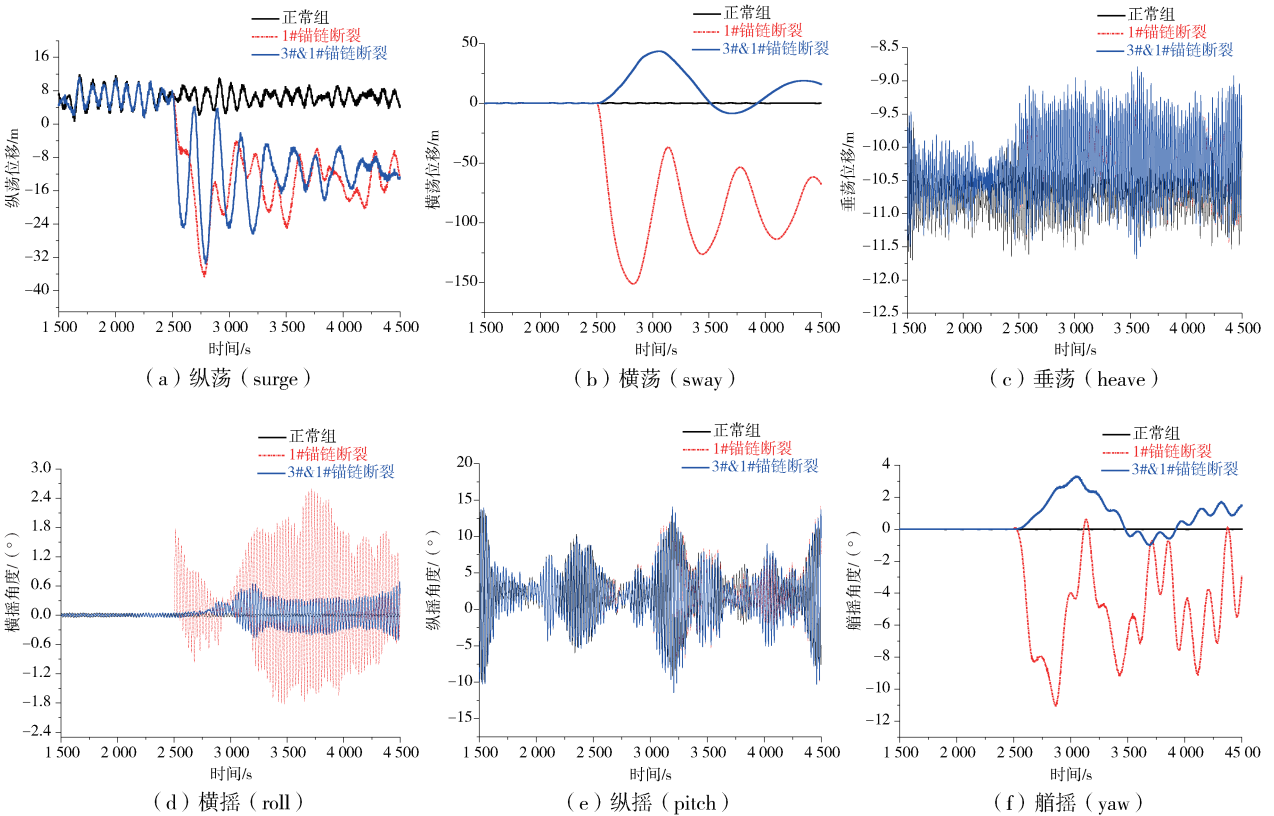


图8 锚链断裂工况六自由度运动响应

Fig. 8 The 6-DOF motion response under the loss of mooring line

荡和横荡方向上出现较大幅度的漂移现象。在垂荡方向上，锚链断裂工况响应值相对较小。横摇方向上，1#锚链断裂出现较大运动响应，最大值达到 $2.6^{\circ}$ ，且运动响应不稳定。

纵摇方向上，工况2(1#锚链断裂)和工况3(3#&1#锚链断裂工况)下，响应均有所增加，但增幅较小，未出现较大运动响应。

艏摇方向上，两种锚链断裂工况下，运动出现较大响应。在此运动响应将极大地影响风机的运行，对风机的对风效果产生较大影响，影响风机系统的正常运行。工况2下，平台艏摇方向发生最大值为 $11.08^{\circ}$ 的旋转。主要原因为单根锚链发生断裂，风机平台系统受到不对称约束力，在单方向荷载作用下，平台整体受力不对称，在艏摇方向发生转动。当3#&1#锚链断裂时，最大值为 $3.31^{\circ}$ 。较1#锚链单独断裂响应幅值减少了70.1%。主要原因在于1#&3#锚链在与风浪荷载垂直方向对称分布，同时断开1#&3#锚链时，平台受到对称的荷载效应，减小了平台的运动响应。

锚链断裂工况下与正常完整工况下各锚链力对

比分析如表4和图9所示。

表4 锚链断裂工况锚链力响应对比分析表

Tab. 4 The comparison of mooring lines force under loss of mooring lines

锚链编号	数据类别	N		
		正常组	1#锚链断裂	3#&1#锚链断裂
1#锚链	均值	$9.01E+05$	$3.01E+05$	$3.01E+05$
	方差	$1.15E+09$	$1.82E+11$	$1.82E+11$
	最大值	$1.02E+06$	$9.92E+05$	$9.92E+05$
	最小值	$8.07E+05$	0	0
2#锚链	均值	$1.42E+06$	$9.95E+05$	$9.48E+05$
	方差	$2.03E+10$	$1.08E+11$	$1.36E+11$
	最大值	$1.89E+06$	$1.84E+06$	$1.84E+06$
	最小值	$8.86E+05$	$5.06E+05$	$3.99E+05$
3#锚链	均值	$9.07E+05$	$4.93E+05$	$3.03E+05$
	方差	$1.16E+09$	$9.32E+10$	$1.84E+11$
	最大值	$1.03E+06$	$1.01E+06$	$1.01E+06$
	最小值	$8.20E+05$	$1.99E+05$	0

与风浪来向的平行的2#锚链为主承载锚链，主要为平台纵荡方向提供约束力。在锚链断裂后，2#锚链力均有减小并在一定范围内来回变化并逐渐趋

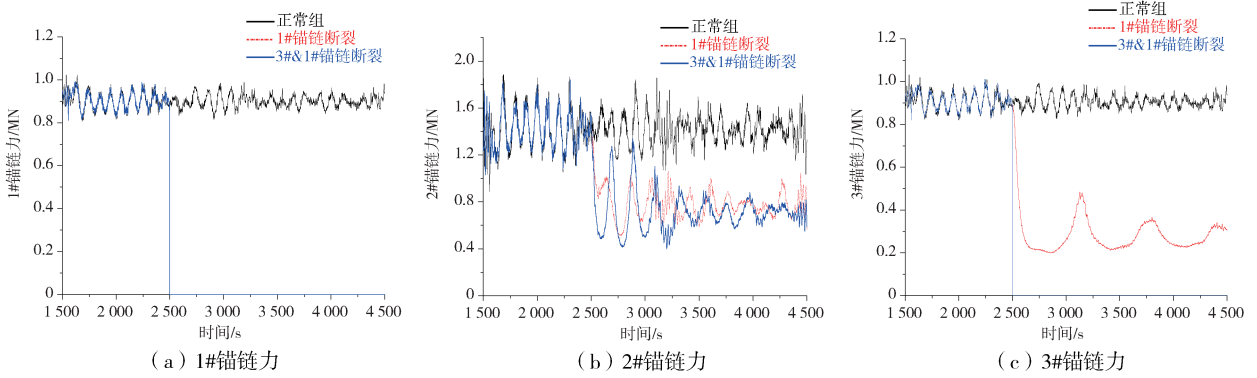


图 9 锚链断裂工况锚链力响应

Fig. 9 The response of mooring lines force under the loss of mooring lines

于稳定。主要原因在于在风浪联合作用下, 平台的运动载荷和悬链线约束共同作用的效果。

### 2.2 舱室破损工况

OC4 DeepCwind 半潜式浮式风机平台有三组双浮筒结构、中柱、横撑和斜撑组成。如图 10 所示, 即为其中的一个双浮筒结构。该浮筒分为上浮筒和下方筒两部分, 中间由隔板分割。上、下方筒为半潜式浮式风力机系统提供浮力, 浮筒中间为压舱水, 用来维持系统的稳定性。当浮筒发生破损时, 平台会发生倾斜, 影响风机系统的稳定运行。

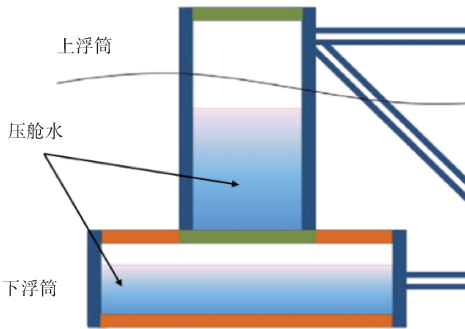


图 10 浮筒侧视图

Fig. 10 Side view of platform

现假定平台下方筒发生破损, 即破舱故障, 故障工况设定如表 5 所示。

表 5 舱室破损工况

Tab. 5 The design load cases of flooded column damaged

工况编号	舱室破损工况
工况 1	正常完整状态
工况 4	1#舱室破损
工况 5	2#舱室破损
工况 6	3# & 1#舱室破损

对于破舱工况的模拟, 主要采用浮力损失法和重量增加法原理。拟采用挖空平台的方法, 根据其浮力的损失状态和重心及质量的改变, 基于势流理论, 对风机平台模型进行重建并对 OC4 DeepCwind 半潜式风机模型进行计算。模拟真实海况条件下, OC4 DeepCwind 半潜式浮式风机系统发生破舱故障工况下的六自由度运动响应对比结果如表 6 和图 11 所示。

表 6 舱室破损工况六自由度运动响应

Tab. 6 The comparison of 6-DOF motion response under the flooded columns damaged

运动方向/单位	数据类别	正常完整状态	1#舱破损	2#舱破损	3# & 1#舱破损
纵荡 /m	均值	6.44	2.52	11.15	-0.72
	方差	3.47	2.12	2.84	3.56
	最大值	11.77	6.70	15.81	5.07
	最小值	0.71	-2.64	6.06	-6.47
横荡 /m	均值	0.09	-4.39	0.09	0.10
	方差	0.02	0.03	0.02	0.02
	最大值	0.43	-3.66	0.52	0.53
	最小值	-0.26	-4.89	-0.33	-0.24
垂荡 /m	均值	-10.76	-8.52	-8.80	-5.51
	方差	0.10	0.13	0.11	0.34
	最大值	-9.61	-7.19	-7.36	-3.07
	最小值	-11.70	-9.83	-10.17	-7.88
横摇 / (°)	均值	0.00	-7.53	0.00	0.00
	方差	0.00	6.14	0.00	0.05
	最大值	0.05	2.16	0.03	0.63
	最小值	-0.05	-16.73	-0.02	-0.61
纵摇 / (°)	均值	2.15	-13.43	8.87	-6.70
	方差	11.86	5.31	9.33	13.8
	最大值	13.55	-4.94	19.90	7.03
	最小值	-10.03	-21.66	-3.52	-20.63
艏摇 / (°)	均值	0.00	1.23	0.02	-0.02
	方差	0.00	0.58	0.00	0.01
	最大值	0.01	3.84	0.11	0.19
	最小值	-0.01	-1.71	-0.07	-0.23

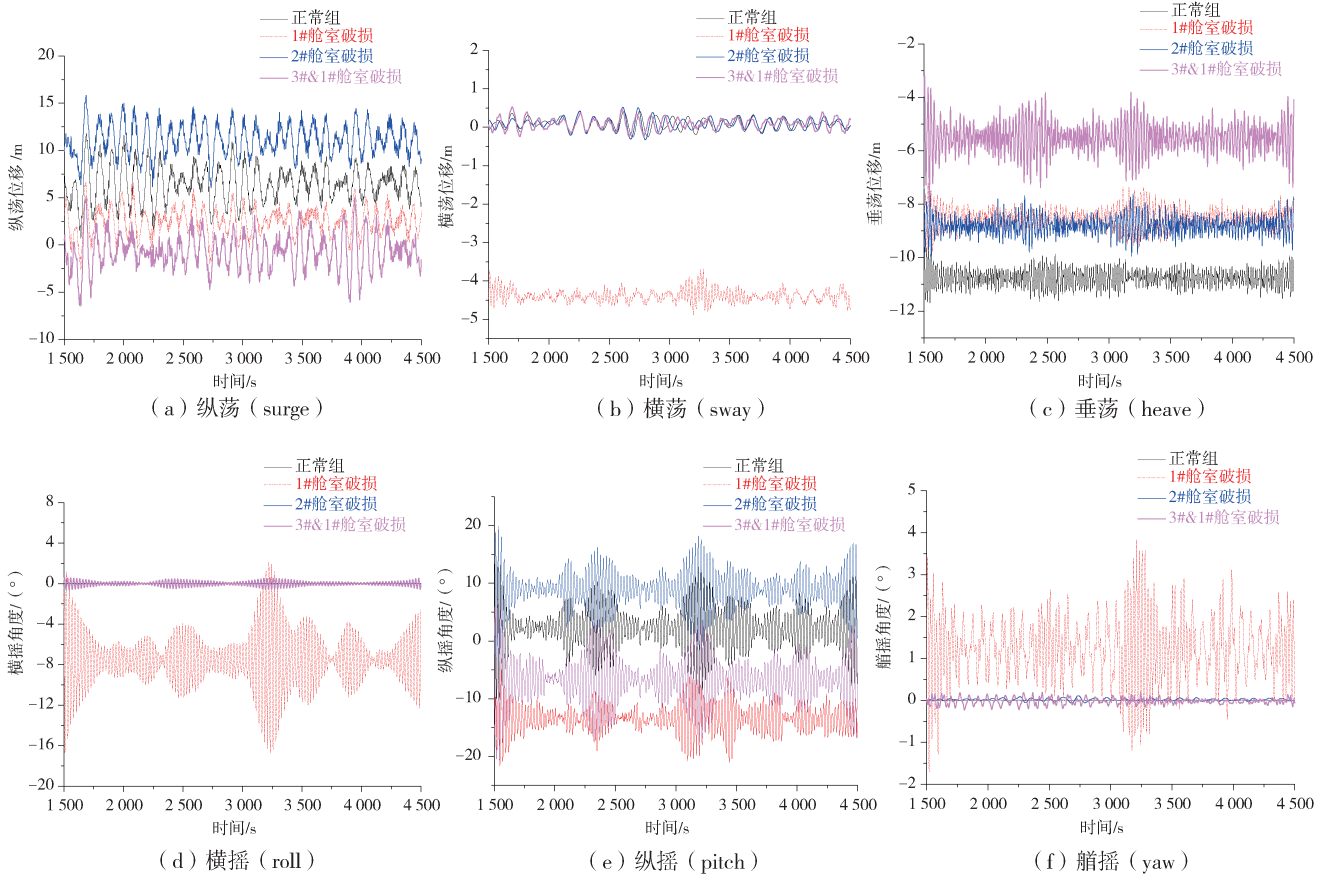


图 11 舱室破损工况下六自由度运动响应

Fig. 11 The 6-DOF motion response under the flooded columns damaged

在六自由度运动响应中,各故障工况下的平台表现出不同的运动特性。在纵荡方向上,2#舱室破损位移最大,最大值达到15.81 m。横荡方向上,1#舱室破损表现出明显异于其他三种工况下的运动响应。由于1#舱室破坏后,舱室内压舱水与海水形成连通,舱室失去浮力,增加重力,致使整个平台系统在单一荷载来向失去原有的平衡状态。失衡后的系统为倾斜状态,破损侧浮筒与海平面接触面积减少。在风浪联合作用下,破损侧受力小于与其关于风浪来向对称侧的为破损浮筒,致使整个平台在横荡方向上发生-4.39 m的偏移。

与上述原因相同,横摇方向上,1#舱室破损工况下响应剧烈,其偏移幅值达到了23.42°。在横摇方向上,平均运动幅值达到了5.5°,幅值响应远大于其他工况。对于海上风电系统来说,叶片俯仰运动对发电功率影响较大。根据Thomas Zambrano等人<sup>[14]</sup>提出的结论,在正常作业状态

下,浮式风机系统平均转动角度应小于 $\pm 5^\circ$ ,最大转动角度应小于 $\pm 15^\circ$ ,该工况下此风机平台无法正常工作。工况5(2#舱室破损)和工况6(3#&1#舱室破损)表现出较小的运动响应。主要原因为:相较于工况4(1#舱室破损),工况1、工况5和工况6均为荷载作用方向两侧质量分布等属性达到平衡状态。

如图12和表7所示,对于1#锚链力,工况4下其锚链力响应大小范围为809~1170 kN,且出现较大的起伏波动,平均锚链力相当于工况1下增加了7.36%。工况4、工况5和工况6下,2#锚链响应变化较小,平均锚链力为145 kN。工况4下,达到最大值193 kN。1#舱室破损对3#锚链力影响明显,如图12-(c)所示,3#锚链最大张力值达到了1180 kN,相较于工况1(正常组)最大锚链力,增幅达到了21.9%。

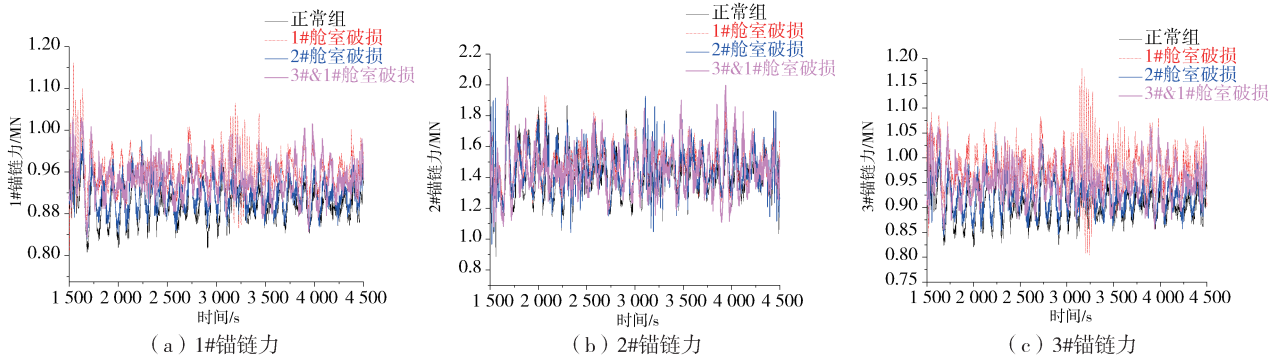


图 12 舱室破损工况下锚链力响应

Fig. 12 The comparison of the response of mooring lines force under the flooded columns damaged

表 7 舱室破损工况下锚链力响应对比分析

Tab. 7 The mooring lines force under the flooded columns damaged N

锚链编号	数据类别	正常组	1#舱室破损	2#舱室破损	3# & 1#舱室破损
1#锚链	均值	8.96E+05	9.62E+05	9.18E+05	9.48E+05
	方差	3.39E+08	1.27E+09	9.54E+08	1.25E+09
	最大值	9.54E+05	1.17E+06	1.02E+06	1.06E+06
	最小值	8.53E+05	8.09E+05	8.31E+05	8.35E+05
2#锚链	均值	1.43E+06	1.48E+06	1.45E+06	1.45E+06
	方差	8.75E+09	1.44E+10	1.90E+10	2.12E+10
	最大值	1.66E+06	1.93E+06	1.92E+06	2.05E+06
	最小值	1.18E+06	1.11E+06	9.64E+05	1.08E+06
3#锚链	均值	9.05E+05	9.80E+05	9.23E+05	9.54E+05
	方差	3.71E+08	1.66E+09	1.06E+09	1.42E+09
	最大值	9.68E+05	1.18E+06	1.05E+06	1.07E+06
	最小值	8.59E+05	8.04E+05	8.41E+05	8.55E+05

### 3 结论

本文采用 ANSYS-AQWA 软件, 主要针对 OC4 DeepCwind 半潜式浮式风机在我国南海海域的海况条件下, 在正常工况下和故障工况下(锚链断裂和舱室破损)的运动特性和动力学响应进行了对比分析。

研究表明: 当单根锚链发生断裂时, 由于浮式风机受锚链力的不对称性, 浮式风机的纵荡和运动会大幅增加, 可能会引起平台失控; 当两根锚链断裂时, 在一定时间内, 运动响应会适当增加。因此建议采用冗余系泊系统, 即单组多根锚链, 在单根锚链失效后平台发生一定的位移, 但平台不会失控, 从而为更换锚链赢取时间。在舱室破损工况

下, 1# 舱室破损会增加平台的运动响应, 因此导致系泊系统的载荷增加。

本文研究成果为我国深海浮式风电的开发提供了一定的参考。此外, 对于舱室破损的工况, 目前规范中并没有给出详细的定义, 其破损机理及数值模拟方法, 需要展开进一步的研究。

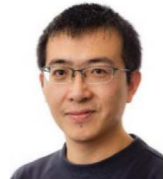
#### 参考文献:

- [1] 徐荣彬, 元国凯, 刘晋超, 等. 海上风机导管架基础灌浆连接段受力分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 80-85. XU R B, YUAN G K, LIU J C, et al. Analysis of grouted connection in offshore wind turbine jacket foundation [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 80-85.
- [2] SHI W, TAN X, GAO Z, et al. Numerical study of ice-induced loads and responses of a monopile-type offshore wind turbine in parked and operating conditions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 123(3): 121-139.
- [3] 赵向前, 黄松苗, 赵梓杭. 一体化理念在国内海上风电开发建设上的应用探究 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 1-6. ZHAO X Q, HUANG S M, ZHAO Z H. Application study of integration concept in domestic offshore wind power construction [J]. Southern Energy Construction, 2014, 1(1): 1-6.
- [4] SHI W, PARK H C, CHUNG C W, et al. Soil-structure interaction on the response of jacket-type offshore wind turbine [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology, 2015, 2(2): 139-148.
- [5] HUIJS F, BRUIJN R D, SAVENIJE F. Concept design verification of a semi-submersible floating wind turbine using coupled simulations [J]. Energy Procedia, 2014, 53(7): 2-12.
- [6] NEJAD A R, BACHYNSKI E E, KVITTEM M I, et al. Stochastic dynamic load effect and fatigue damage analysis of drivetrains in land-based and TLP, spar and semi-submersible floating wind turbines [J]. Marine Structures, 2015, 42(7): 137-153.



- [7] CHENG Z, MADSEN H A, CHAI W, et al. A comparison of extreme structural responses and fatigue damage of semi-submersible type floating horizontal and vertical axis wind turbines [J]. *Renewable Energy*, 2017, 108(8): 207-219.
- [8] TRAN T T, KIM D. The coupled dynamic response computation for a semi-submersible platform of floating offshore wind turbine [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147(12): 104-119.
- [9] CEVASCO D, COLLU M, HALL M, et al. On the comparison of the dynamic response of an offshore floating VAWT system when adopting two different mooring system model of dynamics: quasi-static VS lumped mass approach [C]// American Society of Mechanical Engineers. ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, U. S. A., 2017. U. S. A.: American Society of Mechanical Engineers, 2017: V010T09A067.
- [10] DNV-GL. Standard-floating wind turbine structures: DNVGL-ST-0119 [S]. Norway: DNV-GL, 2018.
- [11] ROBERTSON A, JONKMAN J, MASCIOLA M, et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4 [R]. U. S. A.: U. S. Department of Energy, 2014.
- [12] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development [R]. U. S. A.: U. S. Department of Energy, 2009. DOI: 10.2172/947422.
- [13] 高巍, 董璐, 黄晶. ANSYS AQWA 软件入门与提高 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.  
GAO W, DONG L, HUANG J. Introduction and improvement of ANSYS AQWA software [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.
- [14] 周峰华, 龙小敏, 王盛安, 等. 南海北部水文气象实时观测网 [J]. *海洋技术*, 2013, 32(4): 67-71.  
ZHOU F H, LONG X M, WANG S A, et al. Real-time hydro-meteorological observation network covering the Northern South China Sea [J]. *Ocean Technology*, 2013, 32(4): 67-71.
- [15] 郑崇伟, 周林. 近 10 年南海波候特征分析及波浪能研究 [J]. *太阳能学报*, 2012, 33(8): 1349-1356.  
ZHENG C W, ZHOU L. Wave climate and wave energy analysis of the South China Sea in recent 10 years [J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2012, 33(8): 1349-1356.
- [16] 郑崇伟, 刘铁军, 钱粤海. 中国海海表风场、海浪场与 El Nino 的相关性分析 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(2): 214-223.  
ZHENG C W, LIU T J, QIAN Y H. The relationship between sea surface wind field, wave field and El Nino in the China Sea [J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2014, 36(2): 214-223.
- [17] 郑崇伟, 林刚, 孙岩, 等. 近 22 年南海波浪能资源模拟研究 [J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(6): 13-19.  
ZHENG C W, LIN G, SUN Y, et al. Simulation of wave energy resources in the South China Sea during the past 22 years [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(6): 13-19.
- [18] 刘铁军, 郑崇伟, 潘静, 等. 中国周边海域海表风场的季节特征、大风频率和极值风速特征分析 [J]. *延边大学学报(自然科学版)*, 2013, 39(2): 148-152.  
LIU T J, ZHENG C W, PAN J, et al. Analysis of seasonal characteristics, gale frequency and extreme wind speed around the China Sea [J]. *Journal of Yanbian University(Natural Science)*, 2013, 39(2): 148-152.
- [19] ZAMBRANO T, MACCREADY T, KICENIUK T, et al. Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in gulf of Mexico storm conditions [C]//ASME. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, U. S. A., 2006. U. S. A. American Society of Mechanical Engineers, 2006: 629-634.

---

 作者简介:


SHI W

## 施伟(通信作者)

1983-, 男, 陕西延安人, 大连理工大学深海工程研究中心特聘研究员, 博士生导师, 韩国浦项工科大学博士, 主要从事海上风电研究工作 (e-mail) weishi@dlut.edu.cn.



ZHENG K

## 郑侃

1993-, 男, 湖北宜昌人, 明阳智慧能源集团股份有限公司基础力学工程师, 大连理工大学工学硕士, 主要从事海上风机基础研究工作 (e-mail) zhengkan@my-wind.com.cn.



REN N X

## 任年鑫

1983-, 男, 辽宁辽阳人, 大连理工大学深海工程研究中心教师, 哈尔滨工业大学博士, 主要从事海上风电研究工作 (e-mail) rennianxin@dlut.edu.cn.

(责任编辑 李辉)