

半潜型浮式风机运动特征及系泊系统的研究

邓露¹, 唐梓珈¹, 王彪¹, 宋晓萍², 吴海涛²

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

摘要: 近年来海上浮式风机的研究备受关注, 安全可靠的系泊系统将保证风机在风、浪、流等复杂环境荷载作用下稳定运行, 准确合理地描述风机运动将为评估风机发电效率提供支持。以半潜型浮式风机的系泊系统为研究对象, 基于经典悬链线理论, 采用准静态分析法提出一套系泊系统的设计方法。通过坐标变换, 得到风轮真实的俯仰运动, 用于计算风机的动力效应及评定其发电效率。采用动力法分析了系泊系统锚链的导缆孔位置、预张力大小、锚链间夹角等参数对风机系统发电效率、浮式平台运动性能和系泊锚链张力的影响, 得到了浮式平台迎风面俯仰角、水平偏移及锚链张力随参数的变化规律, 为半潜型浮式风机系泊系统的设计提供了参考。

关键词: 半潜型平台; 系泊系统; 运动性能; 坐标变换; 参数分析

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2016.08.001

Research on Motion Characteristics and Mooring System of Semi-submersible Floating Offshore Wind Turbines

DENG Lu¹, TANG Zi-jia¹, WANG Biao¹, SONG Xiao-ping², WU Hai-tao²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. XEMC Windpower Co., Ltd., Hunan Xiangtan 411102, China)

Abstract: Recently, floating offshore wind turbines have drawn wide attention. A safe and reliable mooring system can secure the dynamic stability of floating offshore wind turbines against the wind, wave and current load and describing the motion characteristics of wind turbines well and truly can support the evaluation of the wind turbine power-generating efficiency. A semi-submersible floating offshore wind turbine was selected as the object, and a reasonable preliminary design method for mooring system was put forward by using the quasi-static analysis method according to the catenary theory. In order to calculate the dynamic response and the power-generating efficiency of wind turbine, the real pitch of the rotor can be obtained the transformation of coordinates. The effects of mooring line parameters (fairlead location, pretension and angle between lines) on the power-generating efficiency of wind turbine, dynamic response of the system and effective tension of mooring chains were analyzed by using the dynamic analysis method. The variations of pitch movement, offset and effective tension with corresponding parameters were gained based on the results of parametric analysis, providing valuable reference for design of mooring system.

Key words: semi-submersible platform; mooring system; motion characteristics; transformation of coordinates; parametric analysis

0 引言

随着海上风电行业的兴起, 近年来浮式风机发展迅速, 半潜型浮式风机因其稳定性好、适用水深范围广等优点而备受关注。浮式风机平台由锚固于海床的

系泊系统固定在一定范围的海域内进行作业, 海上的风、浪、流等环境荷载不仅引起浮式平台产生较大的运动^[1], 而且低频二阶波浪力会使柔性的系泊锚链产生显著的动力响应。这样一方面可能会造成系泊锚链

收稿日期: 2016-03-02; 修回日期: 2016-06-30

基金项目: 国家 863 项目课题 (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, 博士、教授。主要从事海洋平台优化设计和车桥耦合振动等研究。

因强度不够而断裂等安全问题，另一方面也会使浮式平台的动力响应过大，导致风机发电效率急剧下降。因此，安全可靠的系泊系统和准确地表示风轮运动是控制浮式风机正常作业的关键。

对于半潜型浮式风机平台，悬链线式系泊系统是目前应用较多的一种系泊形式，其动力响应受平台运动、流体水动力荷载、海底摩擦等因素影响，动力计算分析较复杂。目前，众多学者对该形式的系泊系统进行了研究，对于 Spar 型浮式风机，穆安乐等^[2]分析了系泊导缆孔位置对其稳定性的影响规律；国际能源组织^[3]通过试验及数值模拟验证了 OC3 项目中浮式风机系泊系统参数选取的正确性。然而，关于导缆孔位置对半潜型浮式风机动力响应的影响的研究相对较少，童波等^[4]研究了锚链间夹角等参数对半潜钻井平台横荡偏移的影响；肖越等^[5]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。相比于钻井平台，浮式风机属于高耸结构，风轮轮毂高出水平面近百米，风轮受到风推力后产生巨大的风倾力矩，使得浮式风机平台难以保持稳定，系泊系统的动力响应更加复杂，直接影响发电效率的是风轮俯仰而非平台俯仰。因此，有必要对半潜型浮式风机平台的系泊系统及风轮俯仰运动进行研究。

在此背景下，本文通过坐标变换准确计算风轮俯仰运动，采用集中质量法对半潜型浮式风机的系泊系统进行数值模拟，并研究导缆孔位置、预张力大小、锚链间夹角等系泊设计相关参数对浮式平台的位移响应和系泊锚链内力的影响。研究结果将为评估浮式风机发电效率及半潜型浮式风机平台悬链线式系泊系统的设计提供参考。

1 半潜型浮式风机参数模型及海况条件

本文以 Collu^[6]设计的半潜型浮式风机为研究对象，风机平台的主要设计参数如表 1 所示，计算分析工况包括作业和生存两种工况，具体的海况信息如表 2 所示。

表 1 浮式平台主要参数

构件参数	数值	构件参数	数值
吃水深度/m	13.5	浮筒直径/m	10
浮筒高度/m	22.5	压载水质量/t	3 700
浮筒中心线距离/m	51.96	压水板半径/m	13
重心高度/m (距离浮筒底部)	22	浮心高度/m (距离浮筒底部)	8.5

表 2 海况信息

海况	水深/ m	有义 波高/m	谱峰 周期/s	平均风 速/m·s ⁻¹	表面流 速/m·s ⁻¹
作业	120	3.9	8.5	11.4*	0.8
生存	120	7.5	13	40	2

注：*为额定风速

综合以往的研究经验和中国的海况规律，谱分析采用的波浪谱选用 JONSWAP 谱，其中谱峰参数取 3.3。

2 系泊系统参数选取

2.1 系泊形式及水平布置

根据安装海域的水深和浮式风机平台三浮筒的结构特点，本文采取悬链式系泊系统，每个浮筒设置一组锚链，每组包括三根锚链，相邻两组之间夹角为 120°，组内相邻锚链夹角为 40°，具体平面布置图如图 1 所示。

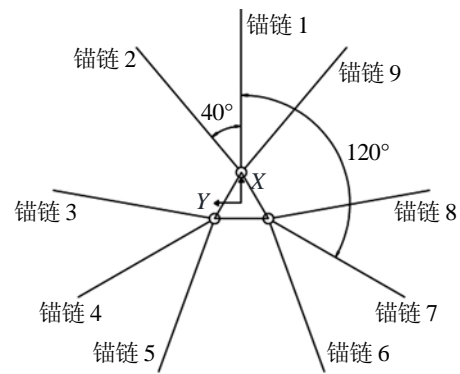


图 1 锚链平面布置图

2.2 设计水平荷载的估算

平台的荷载作用主要是来自周围环境的风、浪、流，初步设计阶段均采用其稳态部分。根据时域模拟软件 FAST 计算得到额定作业工况下定常风荷载大小为 755.6 kN，由于生存工况下风机停止作业，作业在风轮上的风推力变小，其大小仅为 725.6 kN。忽略遮蔽效应，利用拖曳力系数计算方法得到额定作业工况下定常流荷载大小为 132.84 kN，生存工况下其大小为 830.25 kN。波浪荷载的稳态成分平均波浪漂移力 F_{wave} 的计算则使用关系式^[1]：

$$F_{wave} = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) f_d(\omega, \beta) d\omega \quad (1)$$

式中， $S(\omega)$ 为考虑的波浪谱； $f_d(\omega, \beta)$ 为入射角的正则漂移力^[1]； ω 为波浪频率， β 为波浪方向。

经计算，作业工况下 F_{wave} 大小为 48.96 kN，而生存工况下其大小为 50.54 kN。为方便计算与分析，假定风浪流均方向一致，则设计水平荷载 F_L 取两种工况下代数和较大者，即生存工况下 $F_L=1 606.39$ kN。

2.3 系泊锚链尺寸及重量

罗晓健^[7]等研究了单点系泊系统的设计原则，认为初步设计时系泊锚链的安全系数可大致取 3，故系泊锚链断裂强度 F_b 至少为 $F_b=3F_L=4 819.17$ kN。根据 DNV^[8]的相关建议，选择公称直径为 78 mm 的有档锚链，其有效弹性模量 $E=6.433 \times 10^7$ kN·m⁻²，锚链断裂强度为 5 123 kN，空气中每米理论质量为 133 kg，水中每米理论质量为 116 kg，许用强度为 1 708 kN。

2.4 导缆孔大致位置

为了保证结构稳定性, 导缆孔位置不可设置于结构浮心之上。李梦阳^[9]的研究表明, 对于重心比其浮心低的 Spar 型浮式风机, 系泊导缆孔位置设置在其重心高度附近时, 平台的运动响应较小。然而, 半潜型浮式结构的重心比浮心高, 故本文将导缆孔初步设置于浮心高度附近, 得到系泊系统的初步设计水深 $H=115\text{ m}$ 。

2.5 系泊锚链长度预估

由于悬链线式系泊系统的锚固点一般采用拖曳锚, 不能承受竖向拉力, 故系泊锚链触地段应始终与海床相切, 锚链悬垂形状始终保持为悬链线。考虑极限情况下, 导缆孔处系泊有效张力达到许用强度, 此时锚固点处的锚链与海床相切无竖向拉力, 则锚链即将脱锚, 据此可得锚链长度临界最小值。依据经典公式:

$$T^2=R^2+(Wl)^2 \quad (2)$$

$$T=R+WH \quad (3)$$

式中, T 为导缆孔处锚链有效张力; R 为有效张力水平分力; W 为锚链水中每米质量; l 为锚链长度; H 为设计水深。具体参数如图 2 所示。令 T 为锚链许用强度, 得锚链最小长度 $l_{\min}=607.3\text{ m}$ 。实际锚链以节为单位, 每节锚链长度为 27.5 m , 故取整后得每条锚链长度为 632.5 m 。

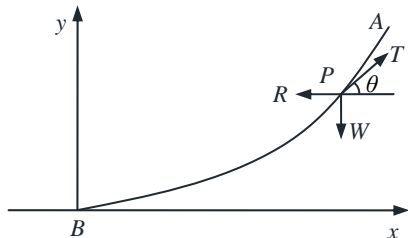


图 2 悬链线示意图

2.6 初始预张力预估

根据悬链线相关理论, 导缆孔的水平偏移使得该处系泊锚链有效张力发生变化。考虑极限情况, 当导缆孔处系泊锚链有效张力达到许用强度时, 此时平台到达最大水平位移处, 根据导缆孔水平位移与该处系泊锚链有效张力的关系, 可求得平台位于初始位置时的导缆孔系泊锚链有效张力, 即初始预张力。目前规范中对于漂浮式风机的最大水平偏移无具体限制, 参考海洋平台水平位移限制条件, 作业工况下最大水平允许位移为水深的 5%, 本设计中为 $6\text{ m}^{[10]}$, 故预张力大小 $T=1\ 010\text{ kN}$ 。

3 动力仿真计算及参数分析

3.1 水动力分析结果

利用专业海工软件 SESAM 建立了包括风机、塔

柱、平台在内的水动力分析模型, 平台的分析模型如图 3 所示。选取波浪周期范围为 $2\text{ s}\sim 60\text{ s}$, 时间间隔为 2 s , 波高为 2 m , 计算波浪力传递函数。考虑 $0^\circ\sim 180^\circ$ 间隔为 30° 共 7 个浪向, 图 4 为荷载作用方向的示意图。SESAM 采用经典势流理论计算得到平台水动力参数以及波浪力传递函数, 将平台信息导入系泊分析软件 Orcaflex 中, 并建立系泊锚链的数值模型, 进行多次 3 h 时域耦合计算, 得到统计结果。

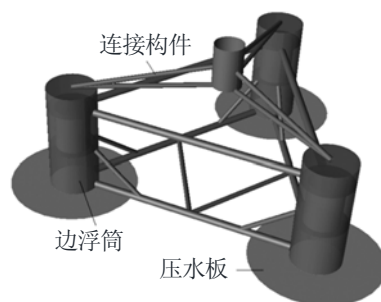


图 3 平台水动力分析模型

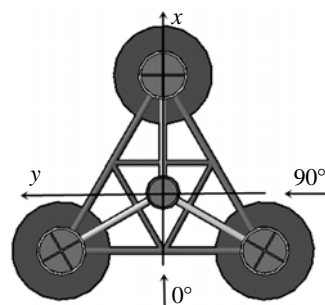


图 4 荷载作用方向示意图

图 5 分别是平台横荡、纵荡、横摇、纵摇、垂荡和艏摇的一阶波浪力传递函数的计算结果。由图 5 可知, 对于横荡、纵荡、横摇和纵摇, 一阶波浪力的峰值均在 $5\text{ s}\sim 10\text{ s}$ 内, 而垂荡波浪力则随着波浪周期的增加呈现先增大再减小, 然后再继续增大的趋势。由于平台形状具有对称性, 艏摇波浪力对 30° 、 90° 、 150° 波浪较为敏感, 峰值周期位于 $5\text{ s}\sim 10\text{ s}$, 由此可知, 一阶波浪力主要激起了平台在平衡位置的波频振荡运动。

3.2 动力仿真结果

将上述初步设计的系泊系统与浮式平台一起进行时域耦合分析, 鉴于平台形式对不同浪向的波浪响应不尽相同, 根据平台的对称性, 此处只计算荷载作用在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围。假定风、浪、流荷载同时作用在一个方向上, 作业工况及生存工况分别取荷载作用角度为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 及 60° 的 5 种海况进行多次 (如 10 次~20 次) 3 h 时域模拟, 统计每次时域模拟的极大值, 然后求取该极值样本的均值, 作为响应的最大值^[11]。本文通过使用 OrcaFlex 软件, 改变随机种子

数,进行了10次计算,得到10种海况下浮式平台运动响应的统计结果,其中系泊张力取统计后最不利系

泊锚链的结果,如表3所示。

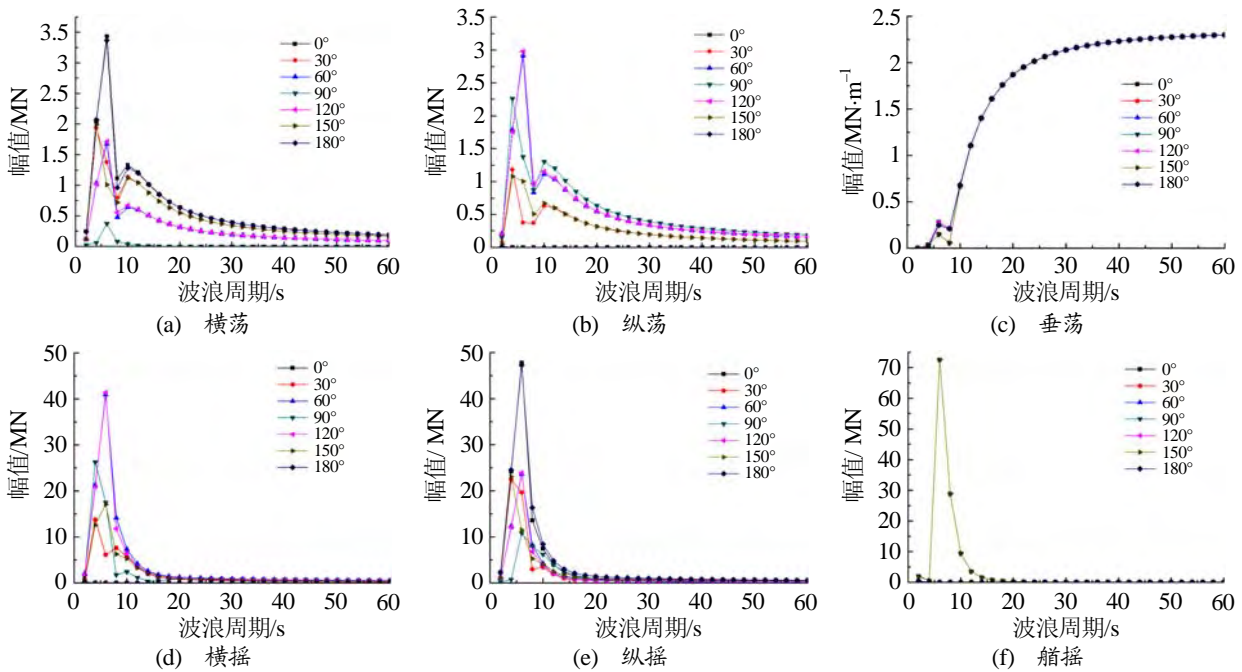


图5 一阶波浪荷载传递函数

表3 平台时域计算统计结果

海况	浪向/(°)	偏移/m			俯仰角/(°)			系泊张力/kN		
		均值	最大	最小	均值	最大	最小	均值	最大	安全系数
作业1	0	1.84	2.66	0.93	4.57	5.55	3.64	1 237	1 325	3.87
作业2	15	1.79	2.58	0.93	4.38	5.26	3.51	1 253	1 336	3.84
作业3	30	1.81	2.58	0.96	4.47	5.23	3.63	1 266	1 344	3.81
作业4	45	1.81	2.70	0.86	4.39	5.17	3.55	1 265	1 344	3.81
作业5	60	1.78	2.76	0.77	4.36	5.18	3.42	1 272	1 370	3.74
生存6	0	5.59	6.49	4.88	2.34	4.85	-0.05	1 567	1 963	2.61
生存7	15	5.49	6.37	4.80	2.21	4.50	0.03	1 585	1 963	2.61
生存8	30	5.55	6.46	4.82	2.24	4.37	0.21	1 598	1 941	2.64
生存9	45	5.61	6.68	4.77	2.16	4.04	-0.05	1 593	1 926	2.66
生存10	60	5.60	6.78	4.72	2.12	4.00	-0.24	1 607	1 986	2.58

动力分析中,当荷载作用方向不与局部坐标系一致时,与考虑平台横荡和纵荡相比,平台距离初始定位点的水平偏移更适合用来描述其运动。同样,对浮式风机而言,风轮平面的俯仰运动比平台的横摇和纵摇更关键。李梦阳^[9]指出半潜型浮式风机正常作业时,平台的平均偏移应不大于水深的5%,即6 m,生存工况下,平台的平均偏移应不大于水深的10%,即12 m; Zambrano 等^[12]指出,正常发电时,浮式风电系统的平均俯仰角需小于±5°,动态俯仰角需小于±15°; Ruoyu Zhang 等^[13]仍仅从局部坐标系下的俯仰来分析风机运动。本文通过坐标变换给出以下偏移及俯仰角的计算公式:

$$S = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4)$$

$$\theta = \theta_x \cdot \cos(90 - \alpha) + \theta_y \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

式中, S 为平台水平偏移; X 为纵荡运动; Y 为横荡运动; θ 为俯仰角; θ_x 为绕 x 轴摇动; θ_y 为绕 y 轴摇动; α 为风荷载方向。具体如图6所示。

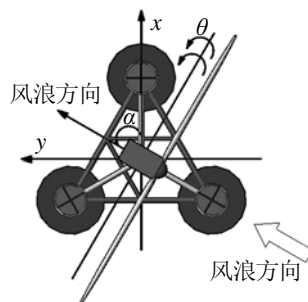


图6 平台俯仰示意图

《单点系泊装置建造与入级规范》^[4]指出作业工况及生存工况下, 采用动力方法计算时系泊锚链的安全系数分别为 2.25 及 1.67。由表 3 可得, 作业工况下平台最大偏移为 2.76 m, 俯仰角均值最大为 4.57°, 动态俯仰角最大为 5.55°, 系泊锚链最小安全系数为 3.74, 均满足相应的限值, 同时生存工况下相关参数也满足限值。由此判断, 该半潜型浮式风机的运动响应及其系泊系统和张力响应均满足规范要求。

3.3 相关参数分析

保持系泊锚链直径及长度等参数恒定, 通过改变预张力、锚链夹角、导缆孔位置来提高系泊系统的性能, 重点分析这 3 个参数对浮式平台动力响应及其系泊锚链张力的影响。

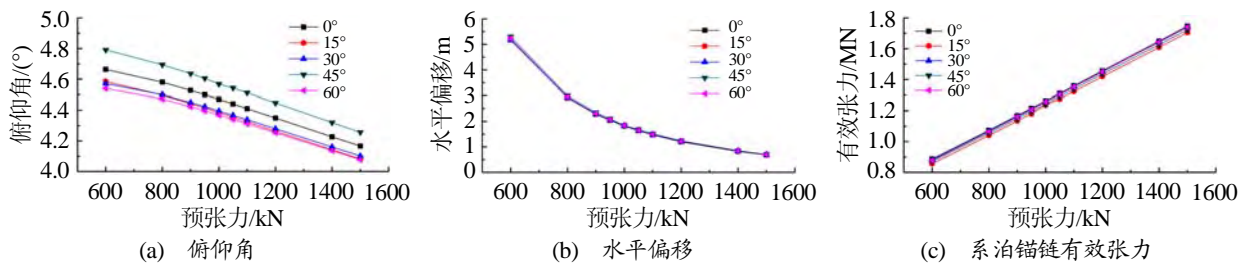


图 7 不同预张力和浪向下的浮式风机动力性能

由图 7 可知, 在满足相关限值的前提下, 随着预张力的增加, 平台平均俯仰角几乎成线性减小, 水平偏移平均值逐渐减小, 且变化的趋势逐渐减小。但系泊有效张力随着预张力的增大而近似成线性增大, 逐渐靠近由安全系数得到的界限强度 2 277 kN, 从安全性的角度可以得出, 通过限制水平位移, 系泊系统的初始预张力取为 1 010 kN 是合理的。为了计算和统计方便, 以浪向为 0°及预张力大小为 1 010 kN 时的平台俯仰运动为分析对象, 对其进行频域分析, 结果如图 8 所示。由于系泊为典型的柔性结构, 在设置系泊系统后, 平台俯仰运动明显以低频成分为主, 这可由图 8 与图 5 比较得到。

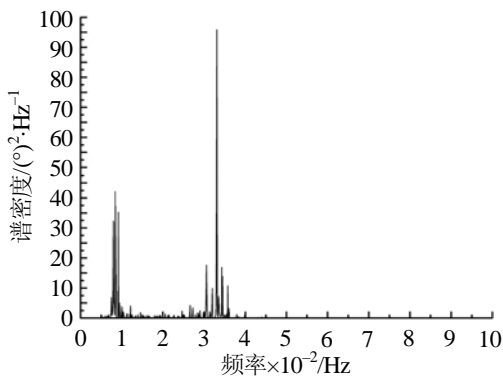


图 8 浮式风机俯仰运动频域分析

3.3.2 锚链夹角

在确定系泊平面布置时, 锚链夹角通常按照总锚

3.3.1 预张力大小

系泊系统的回复刚度具有典型的非线性, 其初始回复刚度由预张力确定, 预张力的 大小 不仅 影响 浮式 平台的 偏移, 同时也 直接 关系到 工作时 系泊 的 张力。为了 研究 预张力 大小 对系泊 系统 性能 的 影响, 保持 其他 参数 不变, 预张力 分别 取 以下 数值: 600 kN、800 kN、900 kN、950 kN、1 010 kN、1 050 kN、1 100 kN、1 200 kN、1 400 kN 及 1 500 kN。为了 重点 考虑 初始 参数 1 010 kN 附近 的 变化 规律, 在其 附近 预张力 大小 选取 较 密集。由于 生存 工况 下 允许 断链, 对 偏移 无 限制, 故 以 作业 工况 为 例, 通过 时域 模拟 计算 统计 得到 浮式 平台 运动 响应 及 系泊 锚链 张力, 结果 如图 7 所示。

链根数 均布 选取。半潜 型 钻井 平台 多 为 四 边 形, 而 半 潜 型 浮 式 风 机 平台 多 为 三 角 形。童波 等^[4]分析 了 四 边 形 半 潜 型 钻井 平台 在 0°浪 向 荷 载 作用 时, 锚 链 夹 角 减小 会 使得 纵 荡 偏移 显著 减小, 但 横 荡 偏移 会 增加。为了 分析 在 不同 浪 向 荷 载 作用 下 锚 链 夹 角 对 风 机 平台 偏移 与 俯 仰 角 的 影响, 在 保持 预 张力 大小 为 1 010 kN 的 情况 下, 改变 每 组 锚 链 夹 角, 得到 不同 夹 角 时 平台 运动 响应 结果, 如图 9 和 图 10 所示。

从图 9 及 图 10 中 可以 明显 看出, 对于 不同 方向 荷 载, 改变 锚 链 夹 角 将会 产生 不同 的 影响。对于 俯 仰 运动 响应 而言, 在 任意 方向 环境 荷 载 作用 下, 随着 锚 链 间 夹 角 的 减小, 系统 俯 仰 运动 响应 均 会 减小, 这是 因为 锚 链 夹 角 越 小, 导 缆 孔 位置 越 远 离 中心, 使得 系 泊 张力 产生 抗 俯 仰 力 矩 的 力 臂 增大。对于 水平 偏移, 在 0°及 15°浪 向 荷 载 作用 下, 随着 锚 链 夹 角 的 减小, 其

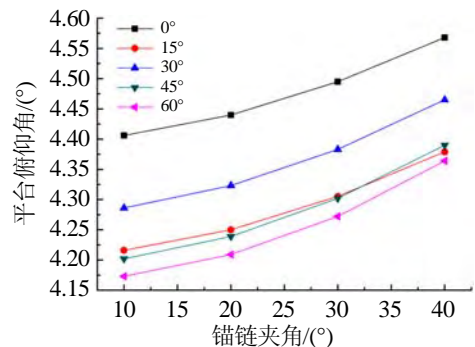


图 9 不同锚链夹角和浪向下的平台俯仰角

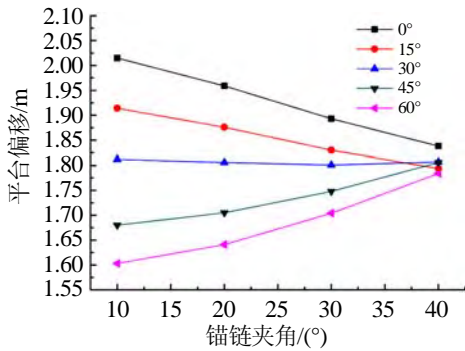


图 10 不同锚链夹角和浪向下的平台偏移

值逐渐增大;而对于 45°及 60°浪向荷载作用下,随着锚链夹角减小,水平偏移逐渐也减小。产生这种现象的原因在于,改变锚链夹角导致锚链张力沿浪向的分力改变,正因为此,对于 30°浪向荷载,随着锚链夹角从 40°减小到 10°,锚链张力沿浪向的分力先增大后减小,水平偏移呈现先减小后增大的趋势。

3.3.3 导缆孔位置

为了研究导缆孔位置对于半潜型浮式平台运动性能的影响,本文从平台初始浮心处(-5 m)至浮筒底部(-13.5 m)依次取五个不同高度的导缆孔位置进行研究,坐标 z 分别为-5 m、-7 m、-9 m、-11 m 及 -13.5 m。数值模拟分析后,结果如表 4 所示。

表 4 导缆孔位置对浮式风机动力性能的影响

坐标/m	偏移/m	俯仰角/°	最不利系泊张力/kN
-5	2.4	5.2	1 241
-7	2.5	5.3	1 250
-9	2.7	5.4	1 262
-11	2.8	5.5	1 280
-13.5	3.0	5.6	1 310

与 Spar 型平台不同,半潜型浮式平台的重心比浮心高,为了保证结构稳定性,导缆孔不可以设置于浮心之上,故将导缆孔设置在其浮心及其以下的位置。本文选择浮心及以下共 5 个不同的导缆孔位置进行研究,由表 4 可知,随着导缆孔位置的降低,浮式平台的水平偏移、俯仰角以及最不利系泊锚链的有效张力均增大。综上可知,导缆孔位置对半潜型浮式平台的动力响应有重要影响,在不能设置于浮心以上的前提下,设置位置离浮心越远则会导致越不利的动力效应,但同时也应考虑安装方便和浮筒壁强度这两个条件。

4 结论

本文对半潜型浮式风机平台系泊系统的若干参数进行了敏感性分析,总结了系泊系统初步设计方法,得到以下结论:

1) 风轮的俯仰直接影响其迎风面积,而迎风面积与风机的发电效率紧密相关。由于风轮可绕塔身旋转,所以平台的横摇和纵摇并不能真实地反应风轮的俯仰,在经坐标变换后可得到风轮真实俯仰,用以计算风机的动力效应和评估风机的发电效率。

2) 系泊系统起着减小平台运动保证风机稳定作业的作用,初始预张力可由平台限制位移条件确定。随着初始预张力的增加,平台俯仰角接近线性减小,平台偏移也逐渐减小,故在确定系泊锚链预张力时,需综合考虑平台运动响应和系泊锚链张力。

3) 对于本文的半潜型浮式风机平台,系泊锚链平面布置及夹角的确定跟平台所处海域荷载方向关系密切,锚链平面布置时应减小锚链与荷载方向夹角,使锚链张力沿荷载方向分量增大,将有利于改善平台的动力特性,同时还应考虑锚链间的碰撞问题。

4) 与 Spar 型平台不同,对于半潜型浮式风机平台而言,导缆孔不可设置于重心附近,而应尽量设置于浮心附近,将能更有效地减小动力响应。

参考文献:

- [1] O.M.Faltinsen. Sea Load on Ships and Offshore Structures [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [2] 穆安乐, 张玉龙, 由艳萍, 等. 系泊参数对漂浮式风力机稳定性的影响规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2015(1): 151-158.
- [3] Jonkman J M. Definition of the Floating System for Phase IV of OC3[M]. National Renewable Energy Laboratory Golden, Co., USA, 2010.
- [4] 童波, 杨建民, 李欣. 深水半潜平台悬链线式系泊系统耦合动力分析[J]. 中国海洋平台, 2008(6): 1-7.
- [5] 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(5): 682-686.
- [6] 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.
- [7] 罗晓健, 张爱霞, 李斌. 单点系泊系统设计思路及原则[J]. 中国海洋平台, 2013(2): 19-23, 56.
- [8] Anchors V. Anchor Manual 2010-The Guide to Anchoring [M]. Rotterdam: Vryhof Anchors, 2010.
- [9] 李梦阳. 海上浮式风机平台锚泊系统设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [10] 李润培, 王志农. 海洋平台强度分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [11] 唐友刚, 桂龙, 曹菡, 等. 海上风机半潜式基础概念设计与水动力性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(11): 1314-1319.

(下转第 26 页)

1) 光伏控制器

监测运行参数: 太阳能电池输入电压 V_{C-in} 、太阳能电池输入电流 I_{C-in} 、光伏控制器输出电压 V_{C-out} 、光伏控制器输出电流 I_{C-out} 和光伏控制器输出功率 P_{C-out} 。

2) 蓄电池 BMS

监测运行参数: 电池组总电压 V_B 、电池组总电流 I_B 和电池组剩余容量 SOC 。

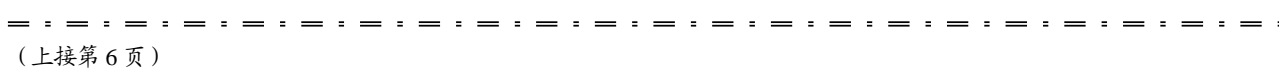
3) 光伏逆变器

监测运行参数: 交流输出电压 V_a 、 V_b 、 V_c ; 交流输出电流 I_a 、 I_b 、 I_c ; 交流输出频率 f ; 交流输出功率 P_{I-out} 。

从上述系统运行参数可以看出: 太阳能电池阵列作为一种典型的非线性电源, 其输出供给到光伏控制器的直流电压和直流电流受日照强度和環境温度的直接影响, 因而存在较大的波动, 其中电压最大波幅为 16.1%, 电流最大波幅 55.9%; 经光伏控制进行稳压和限流后, 电压稳定在 $(340 \pm 2\%)$ VDC, 输出电流(受光伏控制器内所用 JCE108-TS7 型电流传感器精度影响, 部分实测监测数据存在误差)和功率则随受电池端输入功率影响发生波动; 经两组独立的充放电控制单元管理, 1#蓄电池端电压稳定在 $(330 \sim 340)$ VDC 之间, 2#蓄电池端电压稳定在 $(320 \sim 330)$ VDC 之间, 相当于两组之间的单体电池端电压相差 0.1 VDC(100 组串); 逆变器带载运行过程中 1#蓄电池处于正常充电状态, 2#蓄电池处于正常放电状态; 负载功率提升 100%过程中, 光伏逆变器三相输出电压均稳定在 $(220 \pm 1\%)$ VAC 范围内, 负载功率由光伏控制和蓄电池组动态平衡; 整个系统在 4 h 测试运行过程中匹配运行平稳, 各项指标均满足船级社的相关要求。

6 结论

以长江内河商品汽车滚装船 JD800PCC-4#为适用船型, 设计了一套离网型太阳能光伏系统, 通过优化匹配太阳能电池、光伏控制器、蓄电池组和逆变器等设备的主要技术参数, 研发了满足 CCS 入级规范的相应光伏和储能硬件设备以及具有良好人机交互界面的太阳能电力管理系统。实船安装运行测试结果表明, 该系统能够在设定工况下稳定运行, 电能质量参数满足船舶规范要求, 并能够实现光伏电—船电运行模式



(上接第 6 页)

[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.

[13] Ruoyu Zhang, Yougang Tang, Jun Hu, et al. Dynamic

可靠切换。该套光伏系统的成功研制和实船应用对于我国推进发展具有完全自主知识产权的内河营运太阳能船舶具有重大现实意义。

参考文献:

[1] United Nations Conference on Trade and Development. Review of Maritime Transport 2013[M]. New York: United Nations Publications Sales and Marketing Office, 2013.

[2] IMO. Second GHG Study 2009[R]. 2009.

[3] C. Le Quéré. Global Carbon Budget 2013[J]. Earth Syst. Sci. Data Discuss, 2013(6): 689-760.

[4] 中国船级社. IMO MEPC 65 快报[EB/OL]. [2013-05-24]. <http://www.ccs.org.cn/ccswz/>.

[5] Chu S., Majumdar A. Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future [J]. Nature, 2012, 488: 294-303.

[6] 严新平, 孙玉伟, 袁成清. 太阳能船舶技术应用现状及展望[J]. 船海工程, 2016(1): 50-54, 60.

[7] 魏乔, 孙玉伟, 袁成清, 等. 大型远洋运输船舶太阳能光伏系统的构建[J]. 船海工程, 2010(6): 138-140.

[8] 孙玉伟. 海洋环境下船用太阳能光伏系统特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.

[9] 和树海, 袁成清, 孙玉伟, 等. 基于船舶电力系统的光伏并网发电实验平台设计及评价[J]. 船舶工程, 2013, 35(2): 67-69.

[10] 袁成清, 张彦, 孙玉伟, 等. 大型滚装船船电—光伏并网系统构建及电能质量分析[J]. 中国航海, 2014, 37(3): 21-24, 84.

[11] Kyoung-Jun Lee, Dongsul Shin, Dong-Wook Yoo, et al. Hybrid Photovoltaic/Diesel Green Ship Operating in Standalone and Grid-connected Mode-Experimental Investigation[J]. Energy, 2013, 49(1): 475-483.

[12] 孙玉伟, 严新平, 袁成清, 等. 基于多层次同构的船舶智能电网理论体系研究[J]. 船舶工程, 2013, 35(1): 52-56.

[13] 吕志鹏. 多逆变器型微网运行与复合控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

[14] 汪海宁. 光伏并网功率调节系统及其控制的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.

Response in Frequency and Time Domains of a Floating Foundation for Offshore Wind Turbines[J]. Ocean Engineering, 2013, 60: 115-123.

[14] 中国船级社. 海上单点系泊装置入级与建造规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.