

一种新型海上单柱浮式风电平台基础模型*

陆尚平, 詹杰民, 朱立峰, 范庆

(中山大学应用力学与工程系, 广州, 510275, Email:lushp5@mail2.sysu.edu.cn)

摘要: 本文已被广泛研究且有实际安装使用的经典 OC3-Hywind Spar 型浮式风电平台作为原型, 在其基础上进行进一步的结构优化设计, 提出了一种新型单海上柱浮式风电平台基础模型。为了进一步评估新型平台的优化效果, 利用 Solidworks 软件建立了两者的精细模型。接着, 使用 ANSYS Workbench 中的 Hydrodynamic Diffraction 模块计算了无系泊情况下两种模型的幅值响应算子 (RAOs), 并从其中估算出自由状态下模型的固有频率。然后, 根据一般海上环境条件设定了系泊平台的系列工况, 在 Hydrodynamic Response 模块中添加了系泊缆索, 模拟了系泊后平台在风和规则波或相应不规则波组合作用下的响应。最后, 通过 Matlab 软件对时域分析结果进行一系列的数学分析, 总结出本文所提出的新型平台基础的稳定性明显优于经典平台基础。

关键词: 浮式风电平台; ANSYS; 结构优化; 系泊分析; 风浪荷载

1 引言

随着化石能源的日渐枯竭, 寻找可持续发展的新能源成为世界关注的焦点。风能因其清洁、廉价而又丰富的优点逐渐受到大家的广泛关注。截至 2015 年底, 全球风电装机容量较 2014 年增加 17%, 达到了 433 GW^[1]。但由于受到土地可利用空间有限, 且风力资源丰富的地区往往地广人稀, 距离耗电量高的经济发达区域较远, 所以陆上风电可开发空间有限且开发潜力日渐降低, 于是恰好避开的这些缺点的海洋便吸引了人们的注意力。

当今海上风力发电平台选址区域正在不断向对渔业、航运等人们生产活动影响较小, 而且风力资源更加丰富、稳定的深海发展。考虑到可行性及经济成本, 60 m 深度以上的海域, 固定式基础的风电平台便不能适用, 所以绝大部分深海海上风力发电机都采用浮式平台基础^[2]。目前, 常见的浮式平台基础包括驳船型、单柱型(Spar)、半潜式型 (Semi-sub) 和张力腿型 (TLP)。在深海海上风电领域, 大家并没有对采用哪种基础型式最佳达成共识, 但是无疑平台在复杂风浪海况条件下的运动稳定性是设计所关心的核心问题。

挪威的 Hydro Oil & Energy 公司研发了 Hywind Spar 型浮式风电平台^[3], 并在深海区

* 基金项目: 国家重点项目(41407010501); 中央高校基本科研业务费专项基金(No.17lgjc41)
通信作者: 詹杰民, Email: stszjm@mail.sysu.edu.cn

域中里安装 1 台样机，这是世界上首座投入正式使用的浮式风力发电机。德国的 Denis 与 Matha 等^[4]对之前美国学者开发的张力腿平台风力发电机进行了一定的改良，并根据相关的设计标准规范对改良后平台进行了验证评估，发现改良后的平台的运动性能更好。美国的 Lee^[5]创造性地设计两种浮式风电平台，并对它们的运动响应性能进行了全面的评估分析。

国内张亮及其团队研究了在湍流状态风荷载作用下浮式风电平台的运动响应^[6]。随后，他们开发了一套模拟计算风浪耦合作用下平台动力响应的程序，并利用该程序对自己所提出的新型海上浮式风电平台的工作性能进行了系统地评估分析^[7]。Chen 等^[8]使用经典 AQWA 软件对 Spar 型浮式风电平台在风浪流三种载荷耦合作用条件下的动力响应情况进行了仿真模拟，最后提出一种针对 Spar 型浮式风电平台的系泊系统进行优化的方案。

2 浮式风电平台建模

2.1 经典 OC3-Hywind Spar 型平台

2010 年, Jason Jonkman 创造性地提出了一种名为 OC3-Hywind Spar 型海上浮式风力发电机模型^[9-10]，它凭借在风浪作用下稳定性较好、结构简单和建造安装比较方便等优点引起了大量学者的关注。其基本结构见图 1。

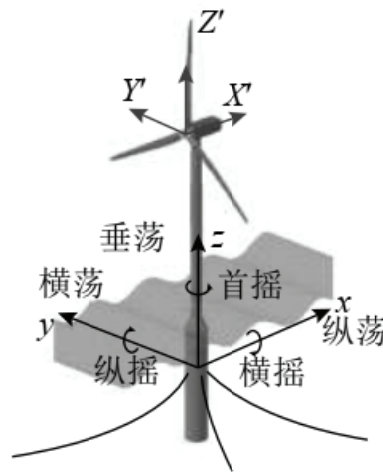


图 1 OC3-Hywind Spar 浮式风机结构示意图

5MW OC3-Hywind 浮式风电平台各部分相关参数如表 1 和表 2 所示。

利用 SolidWorks 软件对其进行三维建模，然后将模型导入到 ANSYS 软件中的 DM 模块，将其由三维实体转化面实体 (Surface Body) 并进行水线切割，然后将处理好的模型导入 Mesh 模块中进行网格划分，网格单元大小设置为 1m(图 2)。

表 1 风电平台参数（静水面为基准）

参数	数值	参数	数值
平台质量/kg	7,466,330	桩台以下直径/m	9.4
平台吃水/m	120	平台重心深度/m	89.9155
平台顶部高度/m	10	纵摇转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	4,229,230,000
桩台顶部深度/m	4	横摇转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	4,229,230,000
桩台底部深度/m	12	首摇转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	164,230,000
桩台以上直径/m	6.5	设计水深/m	320

表 2 系泊系统参数（静水面为基准）

参数	数值	参数	数值
系泊缆索数目	3	未张紧缆索长度/m	902.2
缆索夹角/($^\circ$)	120	缆索直径/m	0.09
锚点深度/m	320	缆索等效密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	77.7066
缆孔深度/m	70	水中缆索重量/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	698.094
锚点相对中心线半径/m	853.87	缆索等效拉伸刚度/N	384,243,000
缆孔相对中心线半径/m	5.2	附加首摇刚度/($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)	98,340,000

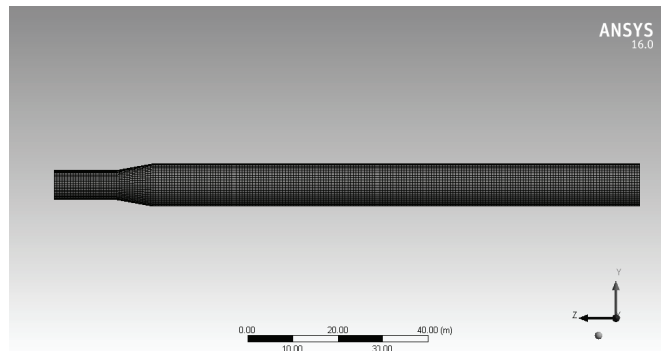


图 2 OC3-Hywind Spar 浮式平台模型及网格划分

2.2 新型单柱浮式风电平台基础模型

本文在上述经典 OC3-Hywind 浮式平台基础上，进行了特定的结构优化改造以提升其稳定性，设计了一种新型单柱浮式风电平台模型，其基本参数与 5MW OC3-Hywind 浮式平台相同。这种新型平台的具体几何参数参见图 3 和图 4，三维模型建模到网格划分（网格单元大小设置仍为 1 m）等流程与上述经典平台流程基本一致。

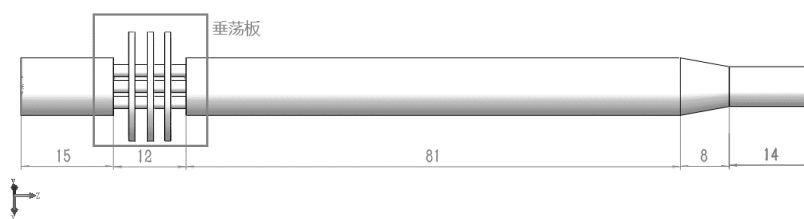


图3 新型浮式风电平台几何示意图1 (单位: m)

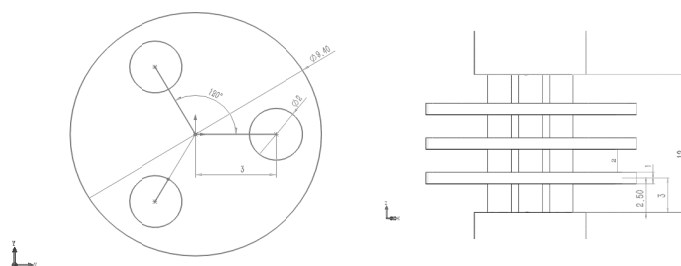


图4 新型浮式风电平台几何示意图2 (单位: m)

为使原始平台在被切割替换入垂荡板后不会对其基本参数造成过大影响,图4中圆盘形垂荡板的半径为8.908 m,以保证垂荡板部分结构的体积及质心位置与替换前的12 m高圆柱体相同从而使得新型浮式平台的排水量、浮心位置等参数与经典平台保持一致。

3 无系泊浮式风电平台频域分析

幅值响应算子(Response Amplitude Operator,RAO)是指浮体结构在一阶波浪力作用下各自自由度波频运动的稳态幅值,表征单位波幅下的特征运动响应。通过对幅值响应算子峰值分布情况的分析可以得出浮体结构的固有频率这一重要参数。

海洋环境中浮体结构的运动形式主要为摇荡运动,即所谓的平移与转动。具体到空间直角坐标系中便是在x,y,z 3个方向的平移与转动,共6个自由度,在海洋船舶工程领域对每个自由度有专门的代称(图1)。对于Spar型浮式风电平台而言,最受关注的是垂荡、纵(横)摇运动,两者之间常常产生耦合运动,对平台工作影响最为明显,本文也主要着眼于平台在此两个自由度上的运动。

不考虑系泊系统的影响,利用ANSYS Workbench中的Hydrodynamic Diffraction模块计算两种平台在各种波浪频段下的幅值响应算子,进而推算出自由状态下平台的固有频率。对计算结果进行处理,提取出两种平台的幅值响应算子数据并作图如下(入射波与x轴正方向夹角为 0°)

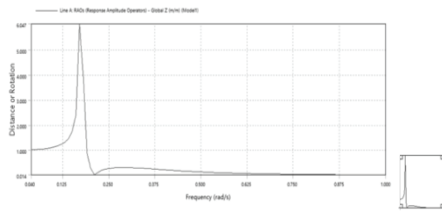


图 5 经典平台垂荡 RAOs

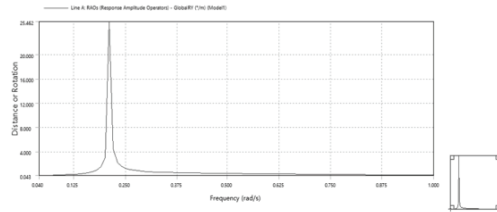


图 6 经典平台纵荡 RAOs

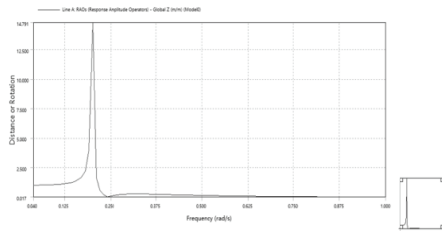


图 7 新型平台垂荡 RAOs

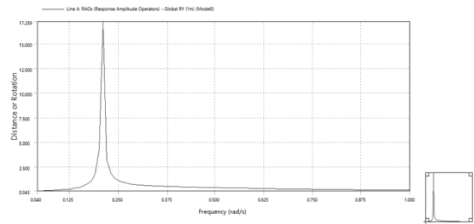


图 8 新型平台纵荡 RAOs

从上述图中可以推测出两种平台的纵摇固有频率（周期）均为 0.21 rad/s（29.92 s），经典平台的垂荡固有频率（周期）为 0.20 rad/s（31.416 s），而新型平台的垂荡固有频率（周期）为 0.17 rad/s（36.96 s）。可见本文提出的新型平台的垂荡固有频率更低，同环境荷载发生共振的几率更小，所以在一定程度上更加安全。

为验证上述仿真模拟的可靠性，本文选取了另外三位学者利用其它软件（如 SESAM、FSAT 等）针对同种浮式风电平台研究结果作为参考：

表 3 经典平台固有频率对比 (rad/s)

自由度	本文	翟佳伟 ^[11]	唐耀 ^[12]	马钰 ^[13]
垂荡	0.20	0.201	0.2	0.2007
纵摇	0.21	0.211	0.2	0.2199

如表 3 所示，本文经典平台仿真模拟所得结果同所在领域内已有研究成果基本一致，说明本文仿真模拟的相关设置及求解过程较为可靠，后续的其他仿真模拟基于此基础上应不会有大的差错。

4 系泊浮式风电平台响应分析

在得到无系泊自由状态下两种平台的固有频率情况下，下面开始根据第二节中的相关参数加入系泊系统，并设定多个风浪共同作用的工况，探究系泊后的两种平台在工作状态

下的运动响应情况，从而更加全面地评估两者稳定性的优劣。

根据表 2 中的相关参数，在平台和海底特定位置分别添加设定连接点及锚定点，然后在对应的连接点与锚定点之间添加建立系泊缆索，并设置好其基本属性。其整体布局如图 9 所示（图中箭头为风浪入射方向）。

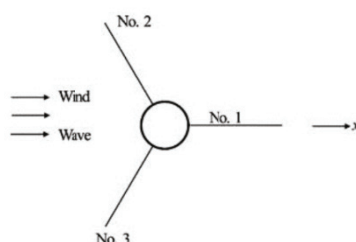


图 9 系泊系统平面布局图（俯视）

风速谱选择的是 NPD 谱，风机轮毂中心高度的参考风速设为其设计工作风速 11.4 m/s；选定的规则波(斯托克斯二阶波)波高为 5 m，周期为 10s；不规则波波谱选择的是 JONSWAP 谱，谱峰周期均为 10 s，有义波高为 4 m 或 6 m。计算时长设定为 3600 s，步长为 0.1s，总步数为 36001 步。总体工况安排如表 4 所示。

表 4 工况设定表

工况	风速/ m/s	波高/ m	周期/s
LC1	11.4	5	10
LC2	11.4	4	10
LC3	11.4	6	10

对于系泊后的平台，我们主要分析其纵荡、垂荡、纵摇以及系泊缆索的张力响应情况，着眼点在于各自由度上的固有频率及运动性能。

通过对平台各自由度运动信号的功率谱进行分析推测系泊后平台各个自由度上的固有频率，将各个工况下推测出的固有频率取平均值便可以得到系泊后两种平台在纵荡、垂荡和纵摇方向上的固有频率（表 5）。

表 5 系泊后平台固有频率 (mHz)

模型	纵荡	垂荡	纵摇
经典	11	32	35
新型	13	24	35

从表 5 可以看出，系泊后的经典平台与新型平台在纵荡和纵摇方向上的固有频率基本一致，但在垂荡方向上，新型平台的固有频率便大大低于经典平台，约有 25%幅度的下降。这就使得新型平台固有周期更大，与周边环境载荷发生共振的几率更低。

但是仅有固有频率的对比还不能较为全面地评估分析两种平台的稳定性优劣，还需对各自由度及缆索张力上时域响应信号进行统计学分析，以此来衡量运动响应的稳定程度及安全性。表 6 至表 8 给出了对两种平台在三种工况下纵荡、垂荡、纵摇的统计分析结果。

通过下面表格可以看出在各个自由度及缆索张力上两种模型的稳定性差异。

表 6 两种平台纵荡性能对比 (m)

工况	模型	平均值	最大值	最值差	标准差
LC1	经典	-1.036	1.326	4.825	0.893
	新型	-1.050	1.362	4.946	0.896
LC2	经典	-1.043	-0.393	1.361	0.216
	新型	-1.053	-0.441	1.380	0.267
LC3	经典	-1.016	-0.084	2.007	0.329
	新型	-1.027	-0.112	2.083	0.408

(1) 纵荡: 在工况 1 条件下, 新型平台响应统计数据基本同经典平台极为相近; 在工况 2、3 条件下, 新型平台响应统计数据较经典平台稍微大一点, 但差距仅停留在第二位小数的程度上。

表 7 两种平台垂荡性能对比 (m)

工况	模型	平均值	最大值	最值差	标准差
LC1	经典	-82.168	-81.827	0.679	0.136
	新型	-81.923	-81.653	0.543	0.113
LC2	经典	-82.190	-81.573	1.236	0.187
	新型	-81.944	-81.526	0.789	0.105
LC3	经典	-82.170	-80.917	2.487	0.387
	新型	-81.922	-81.099	1.556	0.211

(2) 垂荡: 在工况 1 条件下, 新型平台响应幅度较经典平台下降约 20%, 稳定性提高约 17%; 在工况 2、3 条件下, 新型平台响应幅度较经典平台下降约 37%, 在稳定性上更是提高了约 45%。

表 8 两种平台纵摇性能对比 (°)

工况	模型	平均值	最大值	最值差	标准差
LC1	经典	0.00224	1.81	3.62	0.916
	新型	0.0153	1.82	3.61	0.910
LC2	经典	0.00388	0.977	2.037	0.313
	新型	0.02	0.925	1.755	0.274
LC3	经典	0.086	1.493	3.126	0.495
	新型	0.024	1.362	2.582	0.408

(3) 纵摇: 在工况 1 条件下, 新型平台响应统计数据基本同经典平台极为相近; 在工况 2、3 条件下, 新型平台响应幅度较经典平台下降约 14%~17%, 在稳定性上提高了约 12%~17%, 且在最大值上下降了 5%~9%。虽然在平均值上, 新型平台较大, 但倾角仍在工作安全范围内。

综合来看,在三种工况条件下,新型平台在垂荡方向上的运动稳定性都较经典平台有大幅提高;在工况 2、3 条件下,新型平台在纵摇方向上的运动稳定性较经典平台有明显提高;在纵荡方向上,新型平台同经典平台稳定性基本一致。

5 结论

(1) 无论是在无系泊自由状态下,还是在系泊状态下,新型平台的垂荡固有频率都较经典平台低许多,所以新型平台同周边环境载荷发生共振的几率更低,所以在一定程度上更加安全。在其它自由度上两者固有周期基本相同。

(2) 新型平台在垂荡方向上的运动稳定性较经典平台有大幅度的提高,且在纵摇方向上的运动稳定性较经典平台也有明显提高;而在纵荡方向上,新型平台同经典平台稳定性基本一致。

所以可以说明本文提出的新型单柱浮式风电平台基础模型较经典平台模型是有明显进步的,具有可观的继续深入开发研究前景,或可为后续海上浮式风电平台设计提供参考及灵感。

参考文献

- 1 Global Wind Energy Council (GWEC) (2016). Global wind energy outlook 2016[R].[S. 1.]: GWEC,2016
- 2 黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 130-134
- 3 杨先碧. 漂浮的风力发电机[J]. 发明与创新, 2009(11)
- 4 Denis Matha, Tim Fischer, Martin Kuhn. Model Development and Loads Analysis of a Wind Turbine on a Floating Offshore Tension Leg Platform[P]. NREL/CP-500-46725. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2010
- 5 Kwang Hyun Lee. Responses of Floating Wind Turbines to Wind and Wave Excitation[D]. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005
- 6 Xiaorong Ye, Liang Zhang, Haitao Wu, Jing Zhao. Study to Motion Response of Floating Offshore Wind Turbine Under the Turbulent Wind[C]. Electrical and Control Engineering (ICECE) 2011 International Conference. Yichang, China, September 2011
- 7 Haitao Wu, Liang Zhang, Jing Zhao and Xiaorong Ye. Primary Design and Dynamic Analysis of an Articulated Floating Offshore Wind Turbine[J]. Advanced Materials Research, Vol. 347-353, 2012: 2191-2194

- 8 Chen D, Gao P, Huang S, et al. Dynamic response and mooring optimization of spar-type substructure under combined action of wind, wave, and current[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2017, 9(6)
- 9 J.Jonkman and S. Butterfield. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbin for Offshore System Development[R]. Technical Report. NREL/TP-200-38060, February 2009
- 10 J.Jonkman. Definition of the Floating System for Phase IV of OC3[R]. Technical Report. NREL/TP-500-47535, May 2010
- 11 翟佳伟, 唐友刚, 李焱等. 风浪流中涡激共振对 Spar 型浮式风机运动响应的影响[J]. 海洋工程, 2018,36(04):39-49
- 12 唐耀. Spar 型浮式风机平台动力响应分析[D]. 上海交通大学, 2013
- 13 马钰, 胡志强, 肖龙飞. Wind-wave induced dynamic response analysis for motions and mooring loads of a spar-type offshore floating wind turbine[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014,26(06):865-874

A new type of marine single-pillar floating wind power platform basic model

LU Shang-ping, ZHAN Jie-min, ZHU Li-feng, FAN Qing

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275,

Email: lushp5@mail2.sysu.edu.cn)

Abstract: Based on the classic OC3-Hywind Spar floating wind platform, which has been widely studied and actually installed and used, this paper makes further structure optimization, and proposes a new type of spar floating wind power platform. In order to further evaluate the optimization effect of the new platform, the fine models of both are first created by using Solidworks software. And then, the Hydrodynamic Diffraction module in ANSYS Workbench is used to calculate the amplitude response operator (RAOs) of the two models without mooring and the natural frequencies of the models in a free state are estimated. According to the general marine environmental conditions, the series of working conditions of the mooring platform are set, and a mooring cable system is added to the ANSYS Hydrodynamic Response module, which is used to simulate the response of the platform under the action of wind and regular or corresponding irregular waves. Finally, time domain analysis is performed in Matlab software, and it is found that the stability of the new platform foundation proposed in this paper is obviously better than the classical platform foundation.

Key words: floating wind power platform; ANSYS; structure optimization; mooring analysis; wind and wave load