

## 北部湾海上单桩风机动力响应研究

朱江茂, 蒙古彬\*

北部湾大学 广西壮族自治区钦州

**【摘要】**风、浪载荷是海上单桩风机主要承受的环境载荷, 在风、浪作用下风机塔顶会产生振动, 风机桩基产生交变应力等动力响应, 为了研究北部湾海域海况下单桩风机在环境载荷作用下海上单桩风机的动力响应, 本文根据北部湾海域条件为边界条件通过 ANSYS APDL 进行有限元建模, 并设置风机工作和自存两种工况, 分别从风载荷、浪载荷和组合载荷作用下分别对风机的动力响应进行研究, 得到单桩风机在风、浪作用下的动力响应, 及风、浪作用在单桩风机的耦合机理。

**【关键词】**单桩风机; 动力响应; 有限元模拟

**【基金项目】**广西北部湾海上风电装备环境适应性及基础结构优化研究 (桂科 AA22068105-1)

**【收稿日期】**2023 年 11 月 17 日 **【出刊日期】**2023 年 12 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20230031

### Study on dynamic response of offshore single pile fan in Beibu Gulf

Jiangmao Zhu, Zhanbin Meng\*

Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi Zhuang Autonomous Region

**【Abstract】** Wind and wave loads are the main environmental loads borne by offshore single pile fan. Under the action of wind and wave, the top of the fan tower will vibrate, and the pile foundation of the fan will produce dynamic responses such as alternating stress. In order to study the dynamic response of single pile fan under environmental loads in the sea conditions of the Beibu Gulf, In this paper, finite element modeling was carried out by ANSYS APDL according to the boundary conditions of the Beibu Gulf sea area, and two working conditions of the fan were set up and self-storage. The dynamic response of the fan under wind load, wave load and combined load were studied respectively, and the dynamic response of the single pile fan under wind and wave action and the coupling mechanism of wind and wave action on the single pile fan were obtained.

**【Keywords】** Single pile fan; Dynamic response; Finite element simulation

#### 绪论

海上风电具有资源丰富、风能资源稳定、发电利用小时数高、不占用土地等优点, 因此海上风电的开发越来越受全球所关注。海上单桩风机因其结构简单, 施工便捷, 对土壤条件要求不高等优势, 成为海上风电开发的主要桩基类型。由于海上单桩风机所处环境复杂, 所以有必要开展海上单桩风机在环境载荷作用下的动力响应研究。目前对风机动力响应进行研究有的有: 陈法波和夏露<sup>[1]</sup>等将转机机舱组件等效为集中质量单元, 并将空气动力荷载等效为风机荷载, 研究了不同随机风、浪下海上风机三桩基

基础结构动力响应。陈小波和 Sajeer<sup>[2]</sup>等采用该方法研究了随机波浪作用下单桩基础海上风机塔筒动力响应变化规律。

以上学者对风机的响应没有区分风机工作和自存工况风机叶片的载荷不同, 本文根据广西北部湾海域的环境条件, 设置不同工况对风浪载荷作用下的单桩风机动力响应进行分析, 确定风、浪载荷在不同工况下对风机动力响应的影响。

#### 1 风机结构有限元建模

本文采用 Bladed 与 ANSYS APDL 对风机及载荷进行有限元模拟, Bladed 参考 5MW 单桩风机进

作者简介: 朱江茂 (1998-) 男, 汉, 江西上饶, 研究方向: 船舶与海洋结构物设计制造;

\*通讯作者: 蒙古彬 (1979-) 男, 汉, 天津蓟县, 博士, 教授级高工, 研究方向: 船舶与海洋结构物设计技术。

行建模, 在软件中完成叶片、轮毂、塔架、机舱、传动链与控制系统等参数的定义。APDL 建模用 mass 质量点代替风机上部结构, 用 shell181 单元和 pipe59 单元对风筒及桩基结构进行模拟, 用 combine39 单

元模拟桩土相互作用。风机结构的参数见表 1。本文主要研究单桩风机桩基和风筒结构的动力响应, 因此对风机叶片进行简化, 用 mass21 单元代替风机塔顶结构。

表 1 单桩风机参数表

名称	数值
风机高度	78m
叶片长度	57m
设计水深	30m
风筒直径	3~5m
切入/出风速	4/20m/s

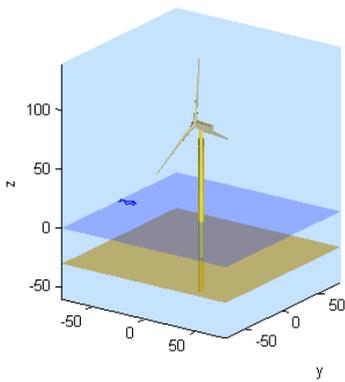


图 1 Bladed 风机模型图

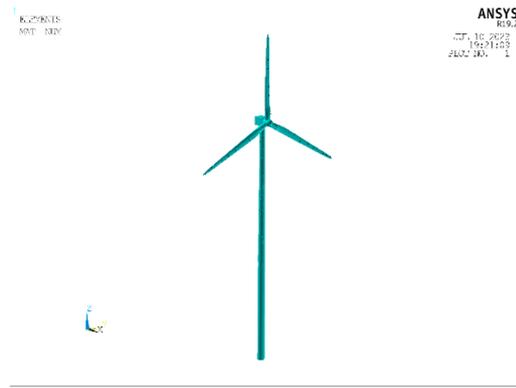


图 2 ANSYS 风机模型图

## 2 载荷模拟

### 2.1 风载荷模拟

海上风机主要承受的环境载荷为风载荷和波浪载荷, 目前, 对于脉动风速时程的模拟主要采用的方法有谐波叠加法、线性滤波法、逆傅立叶变换法、小波分析方法等<sup>[3]</sup>。本文采用 Bladed 软件模拟湍流风谐波叠加法, 用 kaimal 谱定义湍流风场。

基于 Kaimal 谱的湍流纵向分量的自密度谱为:

$$\frac{nS_{uu}(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4\tilde{n}_u}{(1+6.0\tilde{n}_u)^{5/3}} \quad (1)$$

式中  $S_{uu}$ : 风速变化的自密度谱;

$n$ : 变化频率;

$\sigma_u$ : 风速变化标准差;

$\tilde{n}_u$ : 无量纲频率参数,  $\tilde{n}_u = \frac{nL_1}{U}$ ,  $L_1 = 2.329^x L_u$ ,

$xL_u$ : 湍流长度,  $U$ : 平均风速。

对于叶片气动荷载的计算通常采用两种理论,

一是叶素动量理论 (BEM), 二是采用计算流体力学理论 (CFD)。BEM 理论是较为经典和传统的理论, 其计算方便, 在工程中应用较多, 但是其计算精度有限。CFD 理论计算复杂, 需要模拟风机周边的流场, 计算过程复杂, 计算量较大, 但是计算结果较为精确<sup>[4]</sup>。BEM 理论是基于动力理论和叶素理论的联合使用的一种分析风机风轮气动荷载的经典计算理论<sup>[5-9]</sup>。本文采用 BEM 理论计算风机叶片的载荷。在叶素理论中, 假设各叶素之间是独立的, 叶素之间没有相互作用, 通过叶片上每个叶素的所受的升力和阻力可求得整个叶轮所受的轴力, 计算公式 (2)

$$dT = 1/2\rho W^2(C_L \cos\phi + C_D \sin\phi)cdr \quad (2)$$

式中  $W$ : 叶素处相对风速矢量大小;

$\phi$ : 入流角, 定义为相对风速矢量与叶片旋转面的夹角;

$C$ : 叶素的弦长;

$C_L$ : 升力系数,  $C_L = L / (1/2\rho V^2 S)$ ,  $S$  为翼型平面形状面积,  $V$  为相对翼剖面的风速;

$C_D$ : 阻力系数,  $C_D = D / (1/2\rho V^2 S)$ ,  $S$  为翼型平面形状面积,  $V$  为相对翼剖面的风速;

运用 Bladed 软件求出风载荷作用在叶片上的力作为风机的叶片载荷施加在 ANSYS 模型中的风机塔顶。

### 2.2 波浪载荷模拟

海上单桩风机除了风载荷外, 最重要的环境载荷为波浪载荷。波浪荷载与波浪的运动情况直接相关, 正确的描述波浪的波形和波浪的运动是波浪荷载计算的基础。目前, 研究人员建立了微幅波理论、Stokes 波理论、流函数理论和孤立波理论等来描述波浪的运动。本文运用 ANSYS APDL 软件计算水动力载荷, 在软件中可用水表定义波浪的理论, 结合北部湾海域实际海况, 本文选用 Stokes 五阶波理论, 在软件中输入水深、波高和周期三个数据, 便可得到五阶波周长、剖面方程、水质点速度及加速度方程。然后根据莫里森方程计算波浪对桩基的作用力。

### 2.3 风机工况设置

北部湾海域的水深为 10~60m, 适用于海上单桩风机基础, 根据设计需求本次研究调查了北部湾海域不同重现期下风速、浪高及海流等参数, 详细数据见表 2、表 3。

根据表 3 可知 50 年重现期北部湾海域 10 分钟平均风速为 39.1m/s, 波浪的有义波高为 8.2m。风机在正常运作时, 风机叶片设置为迎风向, 且由偏航系统控制角度, 使其捕获更多的风能, 提高发电效率。当风速过大是偏航系统会控制叶片进行偏转, 使受

风载荷减少, 防止风机破坏, 当超过设计切出风速时风机会停机并进行偏航 90°。针对不同载荷设计了两种工况。

## 3 风机动力响应

### 3.1 风机振动分析

海上风机的动力响应主要表现为风机的振动, 风、浪载荷是导致风机振动的主要因素, 当风载荷过大超过风机设计的安全风速时, 风机叶片就会停机并偏航, 使受风面积变小, 减少受力, 本文选取风机正常作业与风暴自存两种环境载荷条件对风机振动进行研究, 下图为风机在不同工况下风机塔顶的位移时程图和加速度时程图。

由风机动力响应图可知风机在工作工况时, 风机塔顶会偏移平衡位置 0.5m 左右, 风机最大振幅为 4.8m, 最大加速度为 4.2m/s<sup>2</sup>。自存工况时, 风机最大振幅 2.2m, 最大加速度 2.0m/s<sup>2</sup>。

### 3.2 风机应力分析

风电桩基应力值也是动力分析重要一部分, 桩基的应力主要和位移的大小呈正相关, 因此选同一时刻风机位移风峰值, 研究风机最大应力及其影响因素。

由表 5 可知, 在作业工况下, 风载荷对桩基应力的影响较大, 波浪载荷对桩基应力的影响比风载荷小, 且风浪联合作用时, 桩基应力工况可能会比单独风作用时载荷小, 证明风浪联合作用时桩基的应力并不是简单的叠加; 在自存工况下, 由于风机叶片偏航, 导致风机受风面积减小, 风载荷对桩基应力的贡献比作业工况小, 且波浪对桩基作用力增大, 自存工况下波浪载荷对桩基应力贡献比风载荷对桩基贡献大。

表 2 北部湾海域设计风速

重现期 (年)	1	5	10	20	25	50
3s (m/s)	36.5	46.2	51.0	54.6	55.5	58.3
1m (m/s)	27.4	34.7	38.3	40.9	41.6	43.9
10m (m/s)	24.4	30.9	34.1	36.5	37.1	39.1
30m (m/s)	23.5	29.8	32.9	35.1	35.7	37.7

表 3 北部湾海域波浪、海流设计参数

重现期 (年)	1	5	10	20	25	50
$H_s$ (m)	4.6	5.9	6.8	7.5	7.7	8.2
$H_{max}$ (m)	7.7	9.9	11.4	12.5	12.8	13.8
$T_p$ (s)	8.7	9.6	10.2	10.8	10.9	11.4
表层流 (cm/s)	108	121	135	149	155	168
中层流 (cm/s)	78	89	102	114	119	130
底层流 (cm/s)	56	63	73	83	88	97

表 4 载荷工况表

	作业工况	自存工况
风速	12m/s	42m/s
波高	5m	8.2m

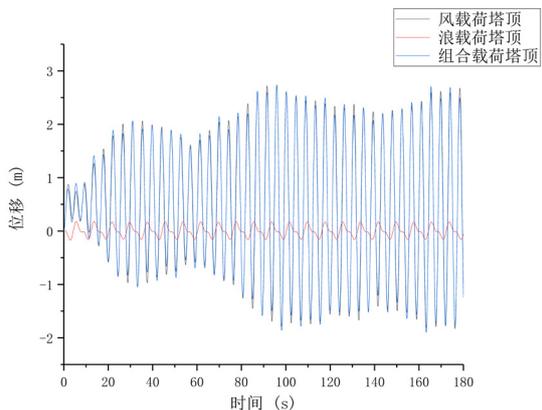


图 3.1 作业工况风机塔顶位移

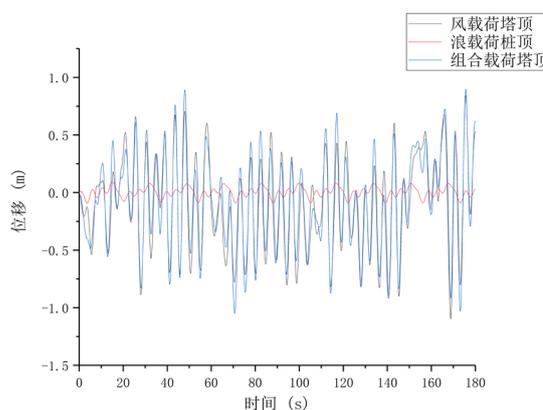


图 3.2 自存工况风机塔顶位移

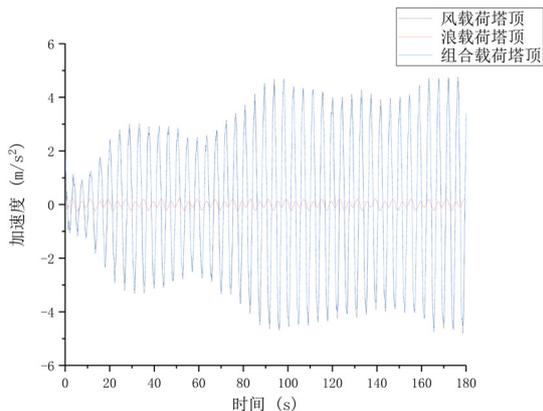


图 3.3 作业工况风机塔顶加速度

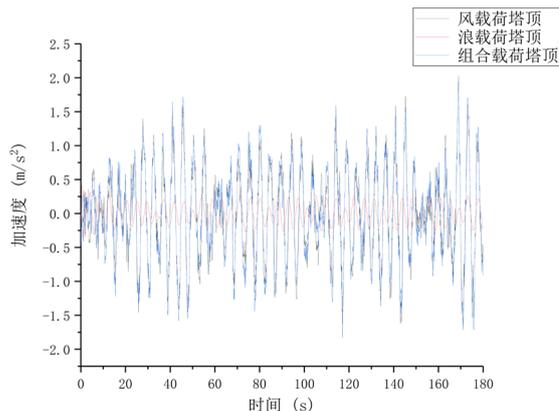


图 3.4 自存工况风机塔顶加速度

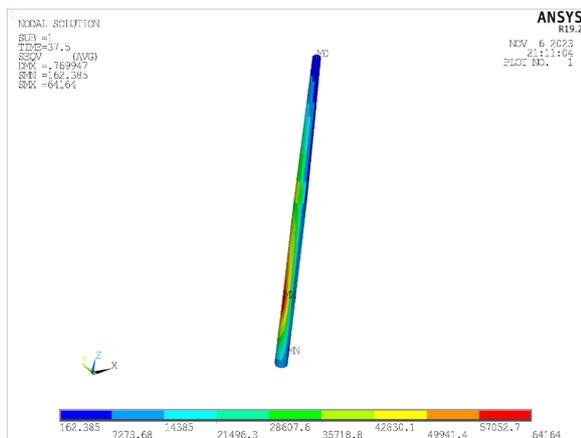


图 3.5 作业工况组合载荷风机应力图

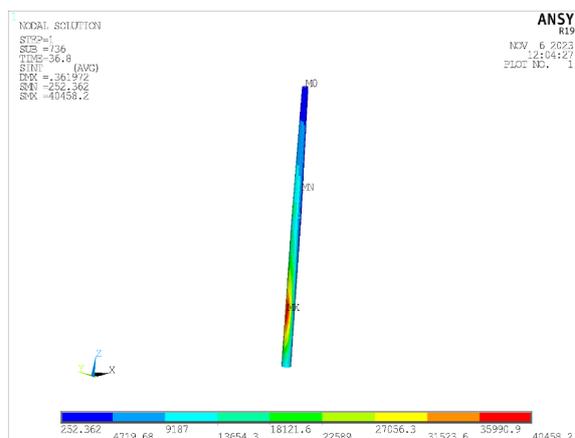


图 3.6 自存工况组合载荷风机应力

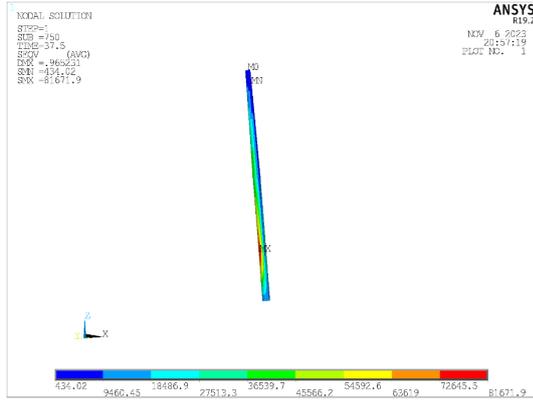


图 3.7 作业工况风载荷风机应力图

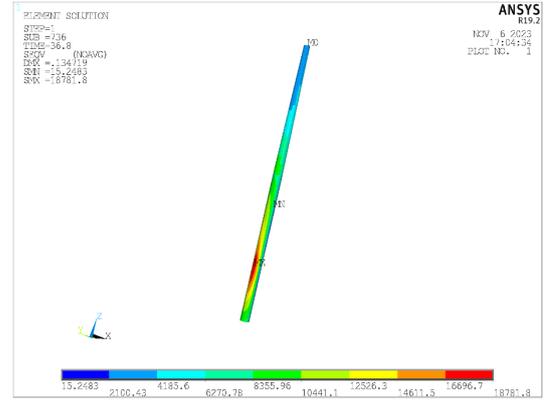


图 3.8 自存工况风载荷风机应力图

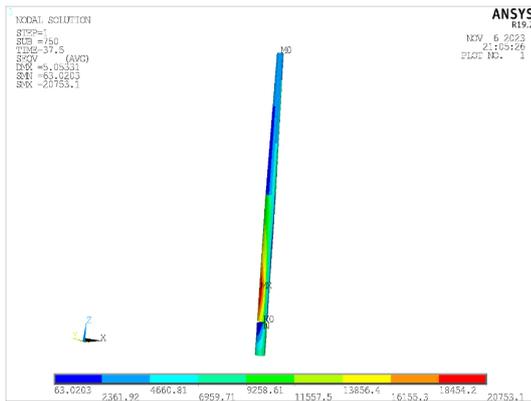


图 3.9 作业工况浪载荷风机应力图

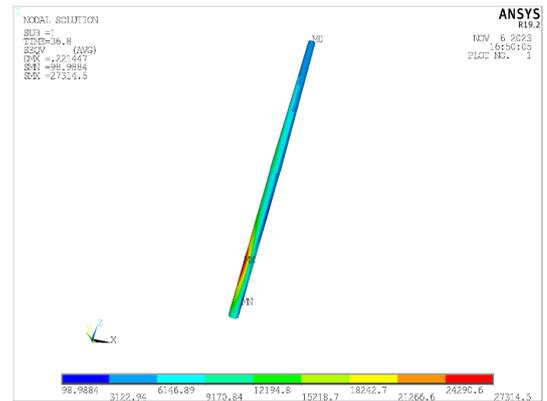


图 3.10 自存工况浪载荷风机应力图

表 5 载荷作用应力表

载荷\工况	作业工况应力 (MPa)	自存工况应力 (MPa)
风载荷	81.7	18.8
浪载荷	20.8	27.3
组合载荷	64.2	40.4

### 4 结论

(1) 正常作业工况下风机位移响应主要由风载荷贡献, 波浪载荷对风机振动贡献小, 风机振动呈周期性; 自存工况下风机的位移响应由风载荷和波浪载荷共同作用, 且波浪载荷对风机位移有明显贡献, 风机呈现不规则振动。

(2) 正常作业工况下风机位移响应比自存工况下的位移响应大, 且正常作业工况风机塔顶会有偏移。

(3) 正常作业工况下风载荷和浪载荷共同对桩基应力造成影响, 且同一时刻风、浪载荷作用应力在桩基上不呈叠加效应, 自存工况下桩基应力由风载

荷和浪载荷联合作用, 且风浪载荷在桩基上应力作用呈叠加。

### 参考文献

[1] 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].大连理工大学,2012.

[2] Sajeer M M, Mitra A, Chakraborty A. Multi-body dynamic analysis of offshore wind turbine considering soil-structure interaction for fatigue design of monopile[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 144: 106674.

[3] 刘锡良,周颖.风荷载的几种模拟方法[J].工业建

- 筑,2005(05):81-84.
- [4] Meyer C J, Kröger D G. Numerical simulation of the flow field in the vicinity of an axial flow fan[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2001, 36(8): 947-969.
- [5] Duquette M M, Visser K D. Numerical implications of solidity and blade number on rotor performance of horizontal-axis wind turbines[J]. *J. Sol. Energy Eng.*, 2003, 125(4): 425-432.
- [6] Giguère P, Selig M S, Tangler J L. Blade design trade-offs using low-lift airfoils for stall-regulated HAWTs[J]. 1999.
- [7] Maalawi K Y, Badr M A. A practical approach for selecting optimum wind rotors[J]. *Renewable energy*, 2003, 28(5): 803-822.
- [8] Maalawi K Y, Badawy M T S. A direct method for evaluating performance of horizontal axis wind turbines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2001, 5(2): 175-190.
- [9] Varol A, İlkılıç C, Varol Y. Increasing the efficiency of wind turbines[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(9): 809-815.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**