

# Structural Strength Analysis of Offshore Wind Turbine Installation Vessel

Ke Chen<sup>1</sup>, Xiqiu Zhang<sup>2</sup>, Xiangyu Lei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>China Shipping Container Lines Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Maritime College, Shandong Jiaotong University, Weihai Shandong

<sup>3</sup>School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai Shandong

Email: 998377@163.com

Received: Mar. 9<sup>th</sup>, 2016; accepted: Mar. 27<sup>th</sup>, 2016; published: Mar. 30<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

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



Open Access

---

## Abstract

The environment load, design load and functional load acting on 86.7 m offshore wind turbine installation vessel were calculated in this paper, and 8 cases including jack-up fixing, lifting and pre-pressure of normal operation were determined. Commercial FEM software—ABAQUS was applied to model the whole hull and structural strength of key components of ship was analyzed. The numerical simulation process could be referred on design of offshore wind turbine installation vessel.

## Keywords

Wind Turbine Installation Vessel, Structural Strength, Loading, FEM (Finite Element)

---

# 海上风电安装船结构强度分析

陈科<sup>1</sup>, 张喜秋<sup>2</sup>, 雷翔宇<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中海集装箱运输股份有限公司, 上海

<sup>2</sup>山东交通学院海运学院, 山东 威海

<sup>3</sup>哈尔滨工业大学(威海)船舶与海洋工程学院, 山东 威海

Email: 998377@163.com

文章引用: 陈科, 张喜秋, 雷翔宇. 海上风电安装船结构强度分析[J]. 力学研究, 2016, 5(1): 26-33.

<http://dx.doi.org/10.12677/ijm.2016.51004>

收稿日期：2016年3月9日；录用日期：2016年3月27日；发布日期：2016年3月30日

## 摘要

本文对一艘86.7 m海上风电安装船在作业过程中可能遇到环境载荷、设计载荷与功能载荷进行计算，并确定了包括自升固定，正常作业起吊与预压在内的8种计算工况。应用大型商用有限元计算软件ABAQUS进行全船有限元建模，并对8种典型工况下的船舶关键部位进行了结构强度分析，为海上风电安装船结构强度分析提供了可供参考的数值方法。

## 关键词

风电安装船，结构强度，载荷，有限元

## 1. 引言

近年来，随着全球环境污染与能源紧缺问题的日趋严重，风能作为一种可再生的无污染能源，其发展得到了广泛的重视。同时，陆上可用空间的有限性与海上更丰富的风能资源，海上风能的开发日益受到重视。从1991年至2009年，欧洲建设完成并投入运用的共有38个海上风电场，装机容量达到2056 MW，占世界海上风电装机容量的三分之二，其中有一半以上的海上风电场是近五年建成[1]。我国目前已建成的海上风电总装机为142 MW [2]，规划2020年海上风电达到3000万KW [3]。

因海上风电机组安装的特殊性，需要专用的安装作业工程船，海上风电安装船应运而生，已是当今海上风电场项目发展的首选装备。海上风电安装船是一种新型的海洋工程船舶，其船型主尺度比例已超出现行规范的要求，在多种工况与不同作业环境下的应力、弯矩等也不能运用相关规范中所提供的简化计算或者等效的计算法则来计算。此外，海上风电安装船船型具有特殊性，船体与桩腿受到载荷，波浪载荷与海流载荷等环境载荷的冲击，在桩腿，固桩架，桩靴等关键部位又会出现设计者最为关心的较高的应力水平。因此，探索海上风电安装船全船应力较高的部位并对其强度校核以保证全船结构的安全性，对海上风电安装船结构强度的直接计算显得尤为必要。

对风电安装船结构强度的研究可采用实验方法、解析方法和数值分析方法三种方法，高额的试验成本限制了实验方法的应用，直接计算与数值计算成为研究者最常采用的方法。谌宗琦，朱翔等人采用直接计算法，对航行工况下的自升自航式风电安装船总强度进行了评估，提出的方法可以为自升式风车安装船的整体强度评估与船型优化提供一定的依据[4]。姚震球，唐文献等对一艘已完成的海上风电安装船关键部位进行了有限元建模分析，得出风电安装船关键部位的结构应力[5]；随后，他们又对海上风电吊装作业船的最危险工况——风暴自存状态下船舶的结构强度进行了分析[6]。

随着计算机技术的发展，将整船划分为有限元来进行分析的全船分析有限元技术成为可能，船体总强度的分析自此有了革命性的突破[7]。本研究利用大型商业软件ABAQUS对一艘86.7米的近海风电安装船进行全船有限元分析，并对8种典型工况下风电安装船关键部件进行了结构强度分析，为海上风电安装船结构强度分析提供了可供参考的数值方法。

## 2. 全船有限元模型的建立

该海上风电安装船的船体为扁平箱型，具有较长的平行中体，方艏，单层平甲板。尾部甲板为开敞的承载甲板，可以运载4台5 MW风电机组。为将船体上升到海平面得以使自身的吊装作业工作环境平

稳，不受海上波浪的影响，安装船设有 4 条桩腿作为支撑。在船尾右舷桩腿固桩架上有可以 360 度旋转的起重吊机。风电安装船全船有限元模型见图 1。有限元模型使用笛卡尔右手坐标系，坐标原点选定在船尾部艉封板延伸面与底板延伸面的交线的中点，X 轴正向指向船首，Y 轴正向指向船左舷，Z 轴正向指向垂直向上。

船体内部舱壁分布情况见图 2。建立模型时主要采用以下两种单元类型：板壳单元(shell element)与梁单元(beam element)。板壳单元有平面内的弯曲刚度，能够承受弯曲应力和平面内的正应力与剪应力；梁单元有两主轴惯性矩以及截面积，能承受拉压与弯曲。

在 ABAQUS 中定义相互作用可以使用“相互作用”模块来创建约束。对于固桩架与船体之间的连接，在建模中使用了“绑定”约束。对于桩腿和固桩架之间的连接，由于本船的升降装置采用的是齿轮齿条啮合形式的传递结构，二者之间使用齿轮齿条传递垂向力。在 ABAQUS 软件中使用“运动耦合”约束来进行模拟动耦合能够更加真实的模拟实际情况。使用耦合约束在上下导向环耦合水平位移，在锁紧区耦合水平和垂直位移。对于固桩架与加强肘板之间的连接，由于在实际工程中二者之间是通过焊接来实现加强作用的，于是使用“绑定”约束能得到较好的模拟效果。

网格数量对计算的精度与计算的时间有最直接的影响。对于船舶结构来说，有相对较为成熟的网格划分原则：沿船长方向主要依据船体的肋位分布，船宽方向上参考船体的纵骨分布[8]。本文中，考虑到所研究的船舶为特殊的工程船，应力水平较普通水面型船舶较大且计算精度要求较高，因此网格密度保持在一个纵骨间距三个单元的量级水平，目的在于使结构单元更为精细。主要构件的四边形单元边长比不超过 1:2。最终全船有限元模型共有节点 649,868 个，单元 766,109 个。

### 3. 计算工况的确定

该风电安装船所受到的载荷包括重力及功能载荷，环境载荷、设计与货物载荷。

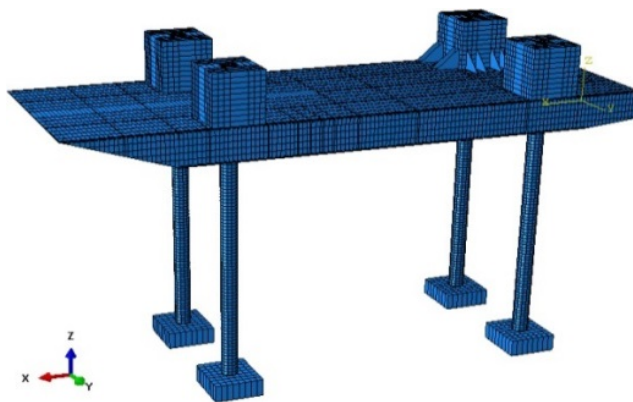


Figure 1. Finite element model of the whole ship  
图 1. 全船有限元模型

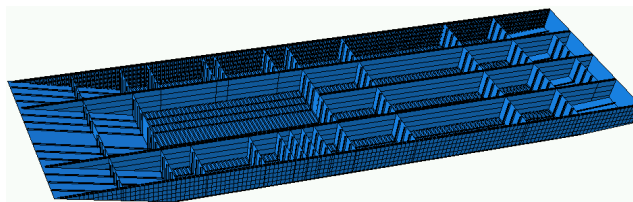


Figure 2. Finite element model of ship hull  
图 2. 船体内部有限元模型

### 3.1. 重力及功能载荷

本船体的钢材重量为 3140.4 t, 采用重力载荷为全船进行加载; 轮机设备重量为 100 t, 根据轮机设备所在的舱室位置以 MPC (多点约束) 的形式作用在对应的结构节点上; 淡水、生活用水以及污水等共计 234 t, 燃油、滑油等共计 340.8 t, 以面压力的方式施加到模型中的对应舱室中的底面上; 船上共设置了 4 个压载水舱来调整船舶的浮态。在载荷的计算中, 使用面压力的形式将压载水载荷施加到压载水舱内的底板上。

### 3.2. 环境载荷

本论文选择风电安装船最危险工况(作业工况)时进行强度校核, 以保证船舶营运过程的安全。作业时, 风电安装船完全自升为平台, 环境载荷考虑风、浪、流共同作用, 其中波浪载荷与海流只作用于桩腿结构上。

风速设计作业要求为: 浦式 6 级(10.8~13.8 m/s), 实际取值 13.5 m/s (27 kn)。风压  $P$  的计算公式参考规范[9]按式(1):

$$P = 0.613 \times 10^{-3} V^2 \text{ KPa} \quad (1)$$

式中:  $V$  ——设计风速, m/s。

作用于构件上的风力按式(2)计算, 并应确定合力作用点的垂直高度。

$$F_w = C_h C_s S P \text{ kN} \quad (2)$$

式中:  $P$  ——风压, KPa;

$S$  ——平台在正浮或倾斜状态时候受风构件的正投影面积,  $\text{m}^2$ ;  $C_h$  ——受风构件的高度系数, 其值可以根据构件的高度  $h$  (构件型心到设计水面的垂直距离);  $C_s$  ——受风构件形状系数, 可以根据风洞试验确定。

波浪力考虑小尺度孤立桩柱上的波浪力, 参考莫里逊公式进行计算[9]:

$$F_w = F_D + F_I \text{ kN/m} \quad (3)$$

其中:  $F_D$  ——单位长度上的曳力,  $\text{kN/m}$ ;  $F_I$  ——单位长度上的惯性力,  $\text{kN/m}$ 。

作用在平台水下部分构件的海流载荷可按式(4)计算[9]:

$$F_f = \frac{1}{2} C_D \rho_w V^2 A \text{ kN} \quad (4)$$

其中:  $C_D$  ——曳力系数;  $\rho_w$  ——海水密度,  $\text{t/m}^3$ ;  $V$  ——设计海流流速,  $\text{m/s}$ ;  $A$  ——构件在与流速垂直平面上的投影面积,  $\text{m}^2$ 。

### 3.3. 设计载荷与货物载荷

本工作船使用的起重机重量约为 600 t, 其中吊臂的重量为 120 t。本船对风电机组的装载量的设计是单程运输量为 4 套单机容量 5 MW 的风机, 采用“兔耳式”运输方式进行装载运输。所谓的“兔耳式”运输, 即由一个机舱和两个叶片组装形成类似兔子耳朵的组合物, 减少了风电机组吊装安装的步骤与工程安装的复杂性。该 5 MW 风机的机舱重 61.6 t, 轮毂重 14.3 t, 叶片重 6.1 t。在船长方向上左右舷依次放置两个机舱和兔耳。兔耳重量以面积力形式加载。

### 3.4. 计算工况的确定

本研究选取工况包括自升后固定, 正常作业起吊以及保证自升式钻井平台地基稳定性而预先施加垂直载荷的下桩预压等不同作业状态和环境组合工 8 种工况。具体说明详见表 1。

#### 4. 计算结果和强度校核

1号工况自升后的固定时船体应力结果见图3。吊机支座固桩架下桩腿、吊机支座固桩架下桩腿边、吊机底座固桩架内部齿轮齿条啮合处应力结果分别见图4~6。

选择吊机底座桩腿、固桩架、桩靴以及横舱壁、舷侧外板、纵舱壁作为海上风电安装船关键观察局部点进行结构强度校核。许用应力按照式(5)进行计算[9]。

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{S} \text{ MPa} \quad (5)$$

其中  $S$  为安全系数，选取依据表2，船体各部分材料的许用应力如表3。

不同工况作用下风电安装船关键部位强度校核结果见表4，表中所示的应力结果为 von Mises 应力结果。

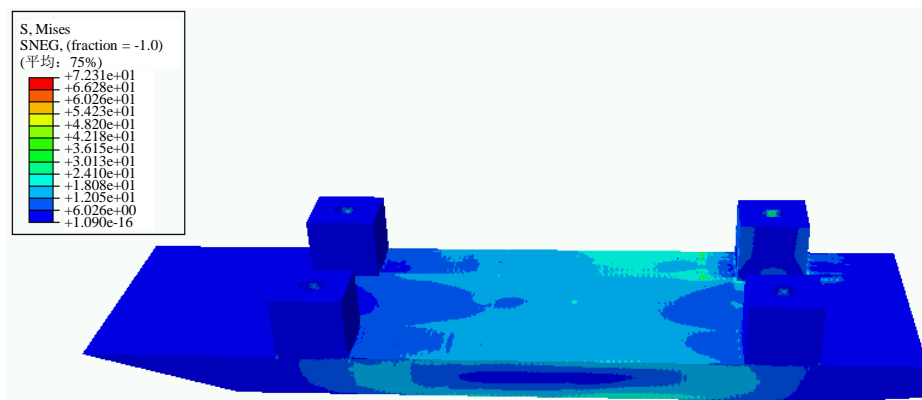


Figure 3. Stress results of hull in case 1

图3. 工况1时船体应力结果

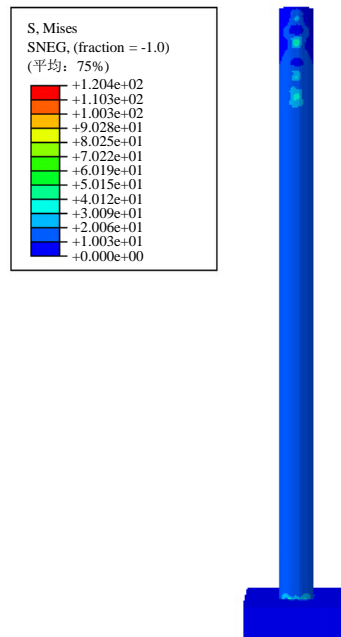


Figure 4. Stress distribution of pile leg under the support of crane

图4. 吊机支座固桩架下桩腿的应力分布

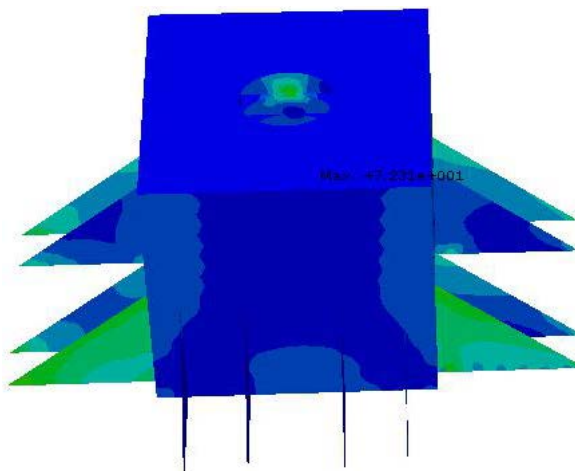


Figure 5. Stress distribution of the pile frame of the crane  
图 5. 吊机基座固桩架应力分布

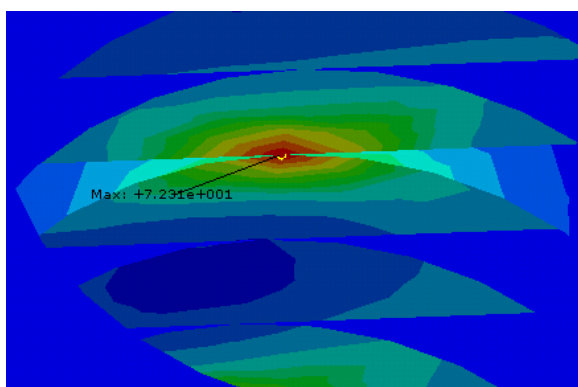


Figure 6. Stress distribution of the gear rack and pinion in the frame of the lifting machine  
图 6. 吊机底座固桩架内部齿轮齿条啮合处应力分布

Table 1. Cases of wind power installation vessel

表 1. 风电安装船的工况确定

工况号	作业状态	风向	吊重	吊臂状态
1	自升后固定	横风	无	固定
2	自升后固定	迎风	无	固定
3	正常作业起吊	迎风	风机自重	沿船长方向
4	正常作业起吊	横风	风机自重	沿船长方向
5	正常作业起吊	迎风	风机自重	沿船宽方向
6	正常作业起吊	横风	风机自重	沿船宽方向
7	预压	迎风	无	固定
8	预压	横风	无	固定

Table 2. Values of safety factor

表 2. 安全系数取用值

	静载工况	组合工况
轴向、弯曲应力	1.67	1.25
剪切应力	2.50	1.88

**Table 3. Critical stress of each part of the hull**  
**表 3. 船体各部位高应力强度校核时许用应力**

船体部位	需用应力(MPa)
船体钢板板材	235
桩腿外板	301
骨架、固桩架	301
桩靴	301

**Table 4. Summary of stress results of ship hull at different cases (unit: MPa)**  
**表 4. 各工况下船体各部位应力结果汇总(单位: MPa)**

工况 \ 部位	甲板	底板	桩腿	固桩架	桩靴	横舱壁	舷侧外板	纵舱壁
1	60.08	29.65	100.8	72.31	120.4	16.63	39.14	39.35
2	59.71	29.46	100.8	73.27	120.8	16.64	39	39.34
3	154.8	66.05	87.62	117.6	104.6	45.61	91.53	102.7
4	155.2	65.97	87.64	117.3	104.2	45.61	91.58	102.5
5	176.2	61.39	203.1	174.8	243.6	93.17	82.11	148.2
6	175	61.26	203.3	174	243.2	92.89	81.93	134
7	67.05	45.04	174	122.2	197.9	24.18	54.85	70.66
8	67.08	45.04	171.1	122.5	198.4	24.17	54.28	70.69
许用应力	235	235	301	301	301	301	235	235
满足强度	是	是	是	是	是	是	是	是

## 5. 结论

- 1) 全船有限元数值分析方法是海上风电安装船结构强度分析的有效工具。
- 2) 本船各关键部位应力水平均在许用应力范围内, 满足结构强度要求。
- 3) 在自升固定工况下, 结构的应力水平不高, 安全程度较高。相比所有工况, 5号工况下的各部分应力结果偏于最大, 最大应力出现在桩靴与桩腿相接部位。
- 4) 升降装置结构是主要的受力装置, 设计过程中使用强度较大的材料, 结构尺寸又大, 故整体应力水平不算高。
- 5) 在各工况中, 应力较大的区域主要集中在兼做吊机基座的固桩架周围肘板与甲板相接处, 以及即齿轮齿条相接部位容易产生应力集中的现象。这里局部的结构在实际建造中应该进行结构加强。

## 参考文献 (References)

- [1] 郭越, 王占坤. 中欧海上风电产业发展比较[J]. 中外能源, 2011, 16(3): 26-30.
- [2] 刘林, 葛旭波, 张义斌, 等. 我国海上风电发展现状及分析[J]. 能源技术经济, 2012, 24(3): 66-72.
- [3] 仲颖, 郑源, 刘美琴, 等. 我国东南沿海海上风电场建设的探究[J]. 可再生能源, 2010, 12(11): 4-9.
- [4] 谌宗琦, 朱翔, 唐永生, 等. 航行工况下自升式风车安装船强度的直接计算[J]. 船舶工程, 2014, 36(S1): 231-235.
- [5] 姚震球, 唐文献, 马宝, 等. 海上风电安装船关键部位结构强度研究[J]. 中国造船, 2012, 53(2): 79-87.
- [6] 姚震球, 杨骏. 风暴自存状态下海上风电吊装作业船强度分析[J]. 船舶力学, 2013, 17(11): 1292-1299.

- [7] 陈灏, 罗展贤. 21000/22600DWT 多用途集装箱船结构设计和直接强度计算[J]. 船舶, 1999(4): 19-25.
- [8] 陈庆强, 朱胜昌, 等. 用整船有限元模型分析方法计算舰船的总纵强度[J]. 船舶力学, 2004, 8(1): 79-85.
- [9] 中国船级社. 海上移动平台入级规范(2012) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.