

DOI: 10.7672/sjgs2025230048

超大吨位自航自升式风电安装平台浮态作业 安全评估与预防措施研究*

张家齐^{1,2}, 章露达², 金晶²

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海 200125)

[摘要] 当在风场海域安装自航自升式风电安装平台时,为满足现有海上风机设备安装条件,提出自航自升式风电安装平台浮态作业方案。通过势流理论计算波浪荷载,采用三维有限元软件分析静载作业、满载与空载航行作业工况下船体结构强度,验证主船体强度满足安全作业要求。在此基础上,进一步围绕现场施工全流程构建技术指导体系,针对作业前准备、作业过程、作业后维护制定精细化操作规范,并从结构应力、设备故障、环境突变、人员安全维度建立多层次安全措施预防体系,为平台浮态作业提供全面的技术支撑与安全保障。

[关键词] 风电;安装平台;浮态作业;波浪荷载;安全;施工技术

[中图分类号] TU755;TM614

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)23-0048-05

Safety Assessment and Preventive Measures for Floating Operation of Super-large Tonnage Self-propelled Jack-up Wind Turbine Installation Platform

ZHANG Jiaqi^{1,2}, ZHANG Luda², JIN Jing²

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: When installing self-propelled jack-up wind turbine installation platforms in wind farm waters, in order to meet the requirements of existing offshore wind turbine equipment, a floating operation plan for self-propelled jack-up wind turbine installation platforms is proposed. Wave loads were calculated through potential flow theory, and the structural strength of the hull was analyzed under static load operation, full-load and light-load navigation operation conditions using 3D finite element software. The verification was carried out to ensure that the strength of the main hull met the safety operation requirements. Based on this, a technical guidance system should be further established around the entire on-site construction process. Detailed operation norms should be formulated for pre-operation preparations, operation processes, and post-operation maintenance. A multi-level safety measure prevention system should also be established from the dimensions of structural stress, equipment failure, environmental changes, and personnel safety, to provide comprehensive technical support and safety guarantees for the floating operation of the platform.

Keywords: wind turbine; installation platform; floating operations; wave load; safety; construction

0 引言

随着海上风电快速发展,风机设备愈加大型

化,作业海域向远海、深水迈进,对风电安装船的施工能力、安全性、可靠性要求越来越高,亟需开发具备自航、自升、可动力定位、可变荷载大、起重能力强、高效、安全、经济的专业化装备^[1]。采用自升式风电安装平台可保证安装过程稳定,但安装自升式风电平台时会遇到起重能力较差、抗风浪能力不足、自航能力差、桩腿与地基承载性能差、气候与环

* 国家自然科学基金(52271284);中交集团重大科研课题;3 500吨吊重深水大型海上风电安装平台设计关键技术研究(2022-ZJKJ-06);上海振华重工(集团)有限公司科研课题;高起升深水自航自升式海上风电作业平台关键技术研究与应用(9908000316)

[作者简介] 张家齐,高级工程师,E-mail: zhangjiaqi@zpmc.com

[收稿日期] 2025-06-20

境多样等难题。为应对复杂的海床条件^[2],提出浮态施工技术。目前国内外通过浮态、半浮态作业方式满足风机安装要求,并应用多个项目中,包括国家电投大丰 H3 海上风电项目、滨海北 H1 风电项目、滨海南 H3 风电项目等^[3-7]。通过浮态作业方式,可有效提升施工效率、降低施工成本,减小对海底地基的影响,本文对超大吨位自航自升式风电安装平台浮态作业的结构安全性展开评估。

1 浮态作业方案

某超大型自航自升式风电安装平台船长 143.8m、船宽 56.6m、型深 13m,艉部右舷设 3 500t 绕桩式回转起重机,该起重机采用双主钩(3 500t+1 200t),通过单桩自行翻身,主钩吊高 160m,副钩吊高 180m,最重 1 200t,满足 22MW 机舱吊装要求。桩腿长 136m,桩靴面积为 280m²,增强了在深远海和软土质风场中的适用性。

该平台主要用于 15~22MW 的风机安装中,最大作业水深 70m,可无限航区航行,主要由主船体、4 个桁架式桩腿、4 套齿轮齿条式升降系统组成。采用流线形船艏、方形艉部,为全焊接钢质船体,中部设双层底,1 层设连续甲板,艏部设生活楼,中部为通畅的作业甲板,艉部右舷桩腿附近设 350t 辅起重机,为国内研发风电平台中首次配备最大功率的可伸缩推进器,具备 DP2 动力定位能力。

考虑风浪流等横向荷载对船体、桩腿的影响,本文主要对平台浮态吊重及航行工况进行计算分析。

2 设计工况及其荷载

2.1 设计工况

主起重机作业状态下的设计环境如表 1 所示,考虑装载货物可变荷载分别为 55 000,85 000kN 和不装载货物 3 种情况。

表 1 设计环境条件

Table 1 Conditions of design environment

项目	浮态主 起重机静载 工作工况	浮态主起 重机动载工作 工况	航行 工况(静水)	航行 工况(波浪)
有义波高/m	—	2.5	—	7.0
谱峰周期/s	—	7.44	—	—
最大风速/ (m·s ⁻¹)	—	17.1	—	51.5
起重机 荷载	5 000kN@ 33m,360° 全回转	5 000kN@ 33m,360° 全回转	—	0

全回转起重机作业时,各工况(以 30°为间隔)如下:①LC1-1~LC1-12,吊载 5 000kN@33m,0°~

330°,包含重力、静水荷载、起重机荷载、起重机搁架荷载;②LC1-13,吊臂抬起,包含重力、静水荷载、起重机荷载、起重机搁架荷载;③LC2-1-h~LC2-12-h,吊载 5 000kN@33m,0°~330°,包含重力、静水荷载、起重机荷载、起重机搁架荷载,为中拱状态;④LC2-13-h,吊臂抬起,包含重力、静水荷载、起重机荷载、起重机搁架荷载,为中拱状态;⑤LC2-1-s~LC2-12-s,吊载 5 000kN@33m,0°~330°,包含重力、静水荷载、起重机荷载、起重机搁架荷载,为中垂状态;⑥LC2-13-s,吊臂抬起,包含重力、静水荷载、起重机荷载、起重机搁架荷载,为中垂状态;⑦LC3-1,可变荷载为 55 000kN;⑧LC3-2,可变荷载为 85 000kN;⑨LC3-3,不装载货物,可变荷载为 37 800kN;⑩LC4-1-h,可变荷载为 55 000kN,属于中拱状态;⑪LC4-1-s,可变荷载为 55 000kN,为中垂状态;⑫LC4-2-h,可变荷载为 85 000kN,为中拱状态;⑬LC4-2-s,可变荷载为 85 000kN,为中垂状态;⑭LC4-3-h,不装载货物,可变荷载为 37 800kN,为中拱状态;⑮LC4-3-s,不装载货物,可变荷载为 37 800kN,为中垂状态。

2.2 设计荷载

2.2.1 设计模型

采用 PATRAN 软件建立全船外表面有限元模型,考虑船体外板、纵壁、内底板、甲板等主要结构,依据规范设定材料属性,将板单元尺寸控制在合理范围,保证计算精度。根据实际约束情况施加边界条件,按工况逐一施加荷载至对应区域,以确保力学分布反映实际状态。

假定主船体外板与桩靴外表面间狭小空隙内的水不流动,建立船体外板连续的湿表面模型,将起重机、吊载及压载水以质量点的形式进行模拟,各剖面的质量来源为全船各肋部位的质量分布,建立船体质量模型。

浮态结构物作业时承受的荷载如下:①重力荷载,由结构物自身质量及载重产生垂直向下的力;②静水荷载,静水对浸没结构表面产生的压力;③惯性荷载,结构物在波浪中运动时因加速度产生的动力;④波浪荷载,波浪与结构物相互作用产生的时变动力。重力荷载、静水荷载、惯性荷载及波浪荷载会形成自平衡状态,本文分析该状态下全船结构的应力响应。

2.2.2 波浪荷载

采用 Sesam 软件的 Wadam 模块对各工况船体波浪荷载进行短期预报,采用 P-M 波浪谱。选取起重机所在的船体剖面、中纵剖面作为设计波的目标

剖面,SECL1015 为主起重机所在横剖面的波浪垂向弯矩,SECL1013 为主起重机所在横剖面的波浪垂向剪力,分析该浪向下持续 3h(即 10 800s)时的极值响应。短期统计结果如表 2,3 所示。

表 2 浮态吊重工况的短期预报受力极值

Table 2 Short-term predicted extreme values of force for floating lifting conditions

工况	SECL1015 短期 响应极值/ (N·m)	SECL1013 短期响应 极值/N	有义波高/ m	谱峰周期/ s
LC2-1(0°)	1.84×10 ⁸	1.39×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-2(30°)	1.83×10 ⁸	1.39×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-3(60°)	1.82×10 ⁸	1.38×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-4(90°)	1.81×10 ⁸	1.38×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-5(120°)	4.17×10 ⁸	1.18×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-6(150°)	4.12×10 ⁸	1.17×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-7(180°)	4.07×10 ⁸	1.16×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-8(210°)	3.96×10 ⁸	1.16×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-9(240°)	3.89×10 ⁸	1.17×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-10(270°)	1.82×10 ⁸	1.38×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-11(300°)	1.83×10 ⁸	1.39×10 ⁷	2.5	7.44
LC2-12(330°)	1.84×10 ⁸	1.38×10 ⁷	2.5	7.44

表 3 航行工况的短期预报受力极值

Table 3 Short-term predicted extreme values of force for navigation conditions

工况	SECL1015 短期响应 极值/(N·m)	SECL1013 短期响应 极值/N	有义波高/谱峰周期/ m	s
LC4-1	4.11×10 ⁸	5.17×10 ⁷	7	8
LC4-2	4.12×10 ⁸	5.23×10 ⁷	7	8
LC4-3	6.03×10 ⁸	5.84×10 ⁷	7	8

2.2.3 起重机工作反力

实际工况下,主起重机的工作反力如表 4 所示,静态无风工作保守按照有风工况的自重、弯矩进行加载,水平荷载对结构影响很小,因此无风工况下忽略水平荷载。

表 4 主起重机的工作反力

Table 4 Working reaction force of main crane

工况	水平力/ kN	垂向力/ kN	倾覆力矩/ (kN·m)	扭矩/ (kN·m)
LC1(全回转)	4.23×10 ³	5.44×10 ⁴	1.17×10 ⁶	8.32×10 ⁴
LC1(抬起起重机)	4.07×10 ³	5.02×10 ⁴	1.90×10 ⁶	1.93×10 ⁵
LC2(全回转)	—	5.44×10 ⁴	1.17×10 ⁶	8.32×10 ⁴
LC2(抬起起重机)	—	5.02×10 ⁴	1.90×10 ⁶	1.93×10 ⁵

2.3 边界及荷载施加

采用 MPC 集中荷载进行加载,船体外板以加载水压形式加载波浪荷载,采用惯性释放的方式,使全船模型施加的荷载(重力、静水荷载、惯性荷载以及波浪荷载)达到自平衡状态后,可仅约束模型刚

体位移。采用船体外板加载水压形式加载波浪荷载,使目标剖面形成弯矩,根据相关规范,采用波浪荷载函数进行拟合加载。

3 安全性校核

根据相关规范确定主船体的许用应力,工况 LC1 为静定工况,其正应力许用值为 212N/mm²,剪应力许用值为 142N/mm²,Von-Mises 的相当应力为 248N/mm²;工况 LC2,LC3,LC4 为动态工况,其正应力许用值为 284N/mm²,剪应力许用值为 189N/mm²,Von-Mises 的相当应力为 320N/mm²。

通过对 48 个工况进行有限元计算,得出当进行浮态作业时,典型工况的最大板单元 Von-Mises 应力如表 5 所示。

表 5 最大板单元 Von-Mises 应力

Table 5 Von-Mises stress of the maximum plate element

工况	最大相 当应力	许用相 当应力	最大 正应力	许用 正应力	最大 剪应力	许用 剪应力
LC1-5	235	248	180	212	130	142
LC2-5-h	247	320	210	284	142	189
LC3-1	193	320	139	284	111	189
LC4-3-h	258	320	234	284	141	189

由表 5 可知:①在浮态主起重机静载作业工况下,主起重机在起重质量 500t、吊臂长度 33m 的情况下,可安全完成作业,且主起重机呈 120°时,其主船体所受应力最大;②当浮态主起重机处于 2.5m 有义波高时,在谱峰周期 7.44s 作业工况下,主起重机起重质量 500t、吊臂长度 33m 的情况下,可安全完成作业,且在中拱状态下,主起重机呈 120°时,主船体所受应力最大;③在静水航行工况下,主船体在可变荷载 55 000kN 时的应力最大;④在施加波浪荷载的航行工况下,当不装载货物、可变荷载为 37 800kN 时,船体在中拱状态下的应力最大。故在 4 种工况下,起重机在不同角度的作业工况及航行工况中,船体结构强度满足浮态作业要求。

4 施工技术与安全措施

海上风电施工受海域环境、作业条件、设备规模等因素影响,需围绕全流程管控、多维度保障的理念构建关键事项体系,结合超大吨位自航自升式风电安装平台浮态作业特性,分为前期规划与勘察、设备与人员准备、现场施工核心控制、环境与气象适配、质量管控、应急管理、后期移交与设备保障等核心模块。

4.1 现场施工指导

现场施工指导以安全性评估结果为核心依据,结合海域环境与平台作业特性,构建全流程、精细

化的操作规范体系,以确保浮态作业各环节可控、可追溯。

4.1.1 作业前准备阶段指导

1) 环境与荷载匹配核查

作业前联合气象部门、海洋观测站获取作业海域未来 72h 的实时气象(风速、风向)、海况(有义波高、谱峰周期、海流速度)数据,以判断实际环境参数是否处于安全作业阈值内。若实际有义波高 > 2.5m(浮态起重机作业工况)或 7m(航行工况)、风速 > 17.1m/s(浮态起重机作业工况)或 51.5m/s(航行工况)时,需暂停作业,并启动环境动态监测机制,每 2h 更新 1 次环境数据,直至参数回归安全范围。同时,核查平台实际可变荷载(货物、设备自重)与设计工况的匹配性。

2) 设备状态专项检查

针对平台核心系统开展预防性检查,需重点测试 3 500t 绕桩式回转起重机的 360°全回转功能(以 30°为间隔逐段验证启停平稳性)、吊臂起升/变幅机构的制动性能,结合起重机荷载参数,通过空载试运行模拟 5 000kN@33m 工况的垂向力(5.44×10^4 kN)、倾覆力矩(1.17×10^6 kN·m)加载过程,并检查支反力传感器、力矩限制器是否能够正常反馈数据。桩腿与升降系统需测试 4 套齿轮齿条式升降装置的同步性,确保桩腿伸缩速度偏差 ≤ 0.5 m/min,锁定机构的啮合深度满足设计要求,避免浮态作业时桩腿晃动引发额外荷载。船体结构需检查主甲板、双层底焊缝是否存在裂纹、变形,并采用超声波探伤仪检测关键剖面的应力盲区,排除初始结构缺陷。

3) 人员培训与方案交底

组织施工人员开展专项培训,包括浮态作业工况的应力分布特性、紧急停机触发条件、应急逃生路线。针对不同作业工况编制操作手册,明确起重机回转速度、起升速度、航行速度等关键参数,通过模拟操作考核确保操作人员熟练掌握不同工况的切换流程。

4.1.2 作业过程动态指导

1) 起重机作业角度与荷载控制

结合主起重机 120°时船体应力最大的评估结论,在起重机 360°全回转作业时进行角度分级监控,当吊臂转向 90°~150°时,将回转速度降至 0.3°/s,同时监测主船体的应力,若应力接近许用值的 90%,立即暂停回转并调整吊臂角度至应力较小区域。吊载过程中需严格遵循匀速起升、平稳变幅的原则,避免突然加载或卸载引发惯性荷载突变。

2) 航行工况船体姿态调整

航行过程中,需根据可变荷载动态调整船体压载水。当遭遇突发波浪时,立即将航行速度降至 3 节以下,并启动减摇鳍装置,若船体横摇角度 > 5°,则暂停航行并抛锚稳定船体,待海况缓解后再继续行驶。

4.1.3 作业后维护与记录

作业结束后对平台进行全面检查与维护,包括清理主起重机钢丝绳(去除海生物、检查磨损程度,若磨损量超过直径 10%需进行更换)、润滑齿轮齿条升降系统、排空压载舱内残留海水。同时整理环境参数、应力监测数据、设备运行日志等作业过程数据,形成单作业循环档案,并重点标注应力异常时段、设备故障处理过程。

4.2 安全措施预防

安全措施预防需构建风险预判-主动防控-应急处置 3 层体系,针对可能面临的结构应力超标、设备故障、环境突变等风险,制定针对性的防控策略,以确保作业安全可控。

4.2.1 结构应力风险防控

1) 实时应力监测系统部署

在关键剖面、起重机搁架安装处、桩腿与船体连接节点等关键部位布置光纤光栅应力传感器,其采样频率为 1Hz,实时采集正应力、剪应力、相当应力数据,并传至中央控制系统。系统内置报警阈值,一级报警时自动提示操作人员调整作业状态,二级报警时立即切断起重机动力,并启动应急制动,避免结构损伤。

2) 荷载分布优化措施

作业前需合理布置货物、设备,遵循对称分布、重心居中的原则。分阶段调整可变荷载,每次加载量不超过设计荷载的 20%,加载间隔 ≥ 30 min,待船体应力稳定后再进行下轮加载,防止荷载突变引发应力集中。

4.2.2 设备故障风险防控

1) 核心设备冗余设计与巡检

主起重机、升降系统、动力定位系统采用冗余配置。升降系统配备备用锁定装置,若齿轮齿条机构失效,备用液压锁可立即锁定桩腿,防止桩腿滑落。同时建立每日巡检-每周维保-每月大修制度,每日巡检重点检查设备运行温度、油压、仪表显示器。每周维保包括清理设备滤网、校准传感器。每月大修时对关键部件进行无损检测,排除潜在故障。

2) 设备故障应急处置预案

针对常见设备故障制定专项预案。当桩腿升降系统卡顿,停止升降操作,检查齿条啮合情况,

若为异物卡阻,需在锁定桩腿后由潜水员下水清理;若为机械故障,则启动备用升降装置将桩腿调整至安全位置。预案需每季度组织1次实战演练,确保操作人员在5min内完成故障响应、15min内启动处置流程。

4.2.3 环境突变风险防控

1) 极端环境预警与规避

与气象部门建立专线联系,提前48h获取台风、寒潮等极端天气的预警信息,当预警显示作业海域出现超过设计值风速或有义波高 $>3\text{m}$ 时,立即启动紧急撤离预案,停止作业并将平台转移至附近避风港,转移过程中需关闭非必要设备,加固甲板货物,确保平台转移途中的稳定性。

2) 海况突变应急措施

作业过程中若遭遇突发海况,应立即停止起重机作业,并锁定吊臂归位,启动压载水应急调整系统,使船体横倾角度 $\leq 3^\circ$ 。若平台出现严重横摇或纵摇,立即抛锚稳定船体,同时组织人员进入船舱安全区域,关闭甲板所有通道,防止人员落水或货物滑落。待海况稳定后,全面检查平台结构、设备,确认无损伤后再恢复作业。

4.2.4 人员安全防护

1) 强制配备个人防护装备

所有平台作业人员必须穿戴抗冲击强度 $\geq 50\text{J}$ 的安全帽,穿耐穿刺、抗压防砸安全鞋,使用浮力 $\geq 150\text{N}$ 的救生衣。在起重机、桩腿附近作业时,需额外佩戴安全带,并配备双钩,确保 ≥ 1 个挂钩处于锁定状态。位于甲板的作业人员需穿戴反光背心,夜间作业时需开启全身反光警示灯,以确保人员可见性。

2) 人员作业区域管控

划分起重机回转半径内、桩腿升降区域为危险作业区,主甲板边缘5m范围内为限制作业区,生活楼、控制室为安全区,在危险作业区设置高度 $\geq 1.2\text{m}$ 的物理隔离栏与警示标识,且非作业人员严禁入内。限制作业区经现场安全员许可后方可进入,且作业时需有专人监护。安全区配备急救箱、氧气瓶、应急照明等应急物资,确保人员在紧急情况下可快速获取救援资源。同时建立人员登离平台登记制度,实时掌握平台人员数量、位置。

5 结语

1) 主起重机作业时,其在起重荷载5000kN、吊

臂长度33m的情况下,均可完成360°全回转作业,且在其工作角度120°时,主船体应力最大。

2) 在航行工况下,船体在满载货物与空载状态下,均可安全完成装载航行。

3) 主船体施加波浪荷载时,中拱状态下的主船体所受应力更大。

通过对某超大型自航自升式风电安装平台浮态作业工况进行安全性评估,将安装平台浮态作业风险降至最低,确保在满足结构强度的同时,实现作业过程高效、可控。

参考文献:

- [1] 刘军涛. 混凝土风电塔筒安装与控制技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(10): 21-26, 38.
LIU J T. Research on installation and control technology of concrete wind power towers[J]. Construction technology, 2025, 54(10): 21-26, 38.
- [2] 刘桢, 俞旻旻, 黄德财, 等. 海上风电发展研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(8): 20-25.
LIU Z, YU J M, HUANG D C, et al. Research on development of offshore wind power[J]. Ship engineering, 2020, 42(8): 20-25.
- [3] 张健翔, 李世飞, 唐勇, 等. 海上风电自升式安装船半浮态施工作业方法[J]. 海洋工程装备与技术, 2025, 12(1): 53-60.
ZHANG J X, LI S F, TANG Y, et al. Semi-floating construction operation method of offshore wind power jack-up installation vessel[J]. Ocean engineering equipment and technology, 2025, 12(1): 53-60.
- [4] 朱俊峰, 周锋, 李飞, 等. 自升式风电安装平台半浮态作业安全性评估[J]. 中国海洋平台, 2022, 37(1): 19-23.
ZHU J F, ZHOU F, LI F, et al. Safety assessment of semi-floating operation of jack-up wind power installation platform[J]. China offshore platform, 2022, 37(1): 19-23.
- [5] 饶广龙, 王鹏, 张宇凡. 自升式海上风电安装平台发展概述[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 16-21.
RAO G L, WANG P, ZHANG Y F. Overview of development of jack-up offshore wind power installation platform[J]. Ship engineering, 2021, 43(10): 16-21.
- [6] 张辉, 刘小亮, 李丽. 国内海上风电关键施工船机装备技术选型[J]. 船舶工程, 2024, 46(S1): 156-159.
ZHANG H, LIU X L, LI L. Technical selection of marine machinery and equipment for key offshore wind power construction in China[J]. Ship engineering, 2024, 46(S1): 156-159.
- [7] 王超, 董鹤. 风电安装船50000kN起重机筒体浮态吊装技术[J]. 江苏船舶, 2024, 41(1): 45-48.
WANG C, DONG H. Floating lifting technology for the cylinder body of a 50,000kN crane on a wind power installation vessel[J]. Jiangsu ship, 2024, 41(1): 45-48.