

海上风电超大型上部组块浮托安装稳定性控制方法分析

郭保东

三峡新能源阳江发电有限公司 广东 阳江 529500

【摘要】：本文研究海上风电超大型上部组块浮托安装的稳定性问题，分析其影响因素及作用机制，提出基于动态载荷分析的稳定性评估方法，并结合工程实践探讨优化安装方案及控制技术在提升稳定性中的应用。结果表明，潮位变化、海况条件及压载调节是关键因素，动态载荷分析可有效预测稳定性变化，优化方案和控制技术显著提升了浮托安装的稳定性和经济性，为海上风电向深水区发展提供技术支撑。

【关键词】：海上风电；超大型上部组块；浮托安装；稳定性；控制方法

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.001

引言

随着海上风电向装机容量大、水深、距离远的快速发展，上部组块尺寸的也逐步增大，安装过程中面临的技术挑战也愈加复杂。特别是上部组块浮托的稳定性问题，直接关系到风电项目的安全性和经济性。由于海上风电场从近海浅水逐步向深水区发展，传统安装方式常需大型设备与复杂流程，易受极端海况及复杂环境干扰，而浮托安装稳定性在这些条件下更重要。针对这一挑战，采用先进的分析方法和控制技术，能够显著提高安装过程中的稳定性，保障工程顺利进行。研究海上风电超大型上部组块浮托安装的稳定性问题，具有重要的实际意义和技术价值。

1 海上风电超大型上部组块浮托安装的稳定性问题分析

随着海上风电行业装机容量增大和上部组块重量增加，超大型上部组块的浮托安装方式也越来越多。而浮托安装法是解决超大型上部组块安装的核心技术，但其全过程均面临严峻的稳定性挑战，直接关系到安装成败与结构安全。其稳定性问题本质上是动态海洋环境荷载、浮体运动响应与精密结构对接三者间的矛盾，主要体现在以下三个方面：

首先，环境荷载复杂且预测存在不确定性。浮托作业依赖短暂的“气象窗口”，长周期涌浪易与船舶固有周期共振，引发大幅摇荡。风、浪、流耦合产生复杂六自由度运动，超出常规起重船作业限制。预测模型微小误差在数小时作业窗口内可能被放大，导致实际海况超出设计工况。

其次，运动同步控制是技术核心与难点。组块载荷从运输船向固定导管架基础转移时，两者相对运动精度需控制在毫米至厘米级。“运动相位差”是致命风险，若船舶升沉与导管架顶面波浪运动不同步，LMU将承受瞬间冲击荷载，可能损坏缓冲元件甚至导致结构倾覆。控制系统响应延迟、DP动力推力不足、压载系统调载速率滞后，都会破坏动态平衡。

最后，载荷转移阶段的动力响应与结构安全是关键风险。载荷转移是动态过程，船体吃水、浮力和稳心高度剧烈变化。

随着万吨荷载逐步卸至基础，运输船排水量骤减，干舷升高，稳性裕度下降，对横浪抵抗能力减弱，存在倾覆隐患。同时，导管架基础及LMU、DSU等结构需在动态条件下承受巨大集中力，对局部结构强度要求极高。

因此，浮托安装稳定性控制是系统工程，需通过高精度气象预报、基于数字孪生的实时监测-预测-反馈控制，以及精细化的压载与DP协同操作来综合应对，确保在复杂海洋环境中完成精准作业。

2 影响浮托安装稳定性的主要因素及其作用机制

在海上风电超大型上部组块浮托安装过程中，影响稳定性的主要因素及其作用机制复杂多样，其中潮位变化、海况条件以及压载调节是关键因素。以三峡如东海上换流站的浮托安装为例，其总重量达到2.3万吨，平面面积接近一个标准足球场，高度约等于15层居民楼。由于其重量远超目前世界最大吊装能力的起重船1.2万吨的限制，传统浮吊安装模式无法满足需求，因此采用了浮托法进行安装。

潮位变化对浮托安装的稳定性起着至关重要的作用。在三峡如东海上换流站的安装过程中，涨潮时水位上升，运输船拖载海上换流站驶入导管架所在位置。随着落潮时水位的下降，换流站与导管架实现精准对接。这一过程充分利用了自然潮汐的“水涨船高”和“随低就低”的原理，确保换流站能够平稳地“坐”在导管架上。因此，潮位的精准预测和利用是浮托安装成功的关键之一。

海况条件，包括风浪流等环境因素，对浮托安装的稳定性也有显著影响。三峡如东海上换流站的安装团队通过多个定点气象预报的相互验证，寻找精准的浮托安装窗口期，确保风浪流等环境数据均在浮托安装设计值内。在安装过程中，项目团队还建立了施工路径气象预报机制，识别施工风险并制定应急预案，以应对作业窗口期短、海况多变等挑战。

压载调节是浮托安装过程中用于维持稳定性的关键技术手段。在三峡如东海上换流站的安装中，通过驳船的压载调节来优化浮托过程。在涨潮时，驳船排出压载水，使船体吃水深

度减小，增加浮力，确保换流站的浮态稳定；在落潮时，驳船注入压载水，使船体吃水深度增大，增强稳定性，防止因潮位变化导致的浮力不足。这种压载调节方式能够有效应对潮位变化带来的不稳定因素，确保浮托安装过程的平稳进行。

综上所述，潮位变化、海况条件以及压载调节是影响浮托安装稳定性的主要因素。在三峡如东海上换流站的安装过程中，通过精准利用潮汐变化、严格控制海况条件以及科学的压载调节，成功实现了超大型海上换流站的浮托安装，为后续类似工程提供了宝贵的经验和技術参考。

3 基于动态载荷分析的浮托稳定性评估方法研究

在海上风电超大型上部组块浮托安装过程中，基于动态载荷分析的浮托稳定性评估方法是确保安装安全与高效的关键技术手段。动态载荷主要包括波浪、海流、风力等环境因素引起的外力，以及安装过程中自身运动产生的惯性力。这些载荷的动态特性直接影响浮托安装过程中的稳定性。通过对动态载荷的精确分析和建模，可以有效预测浮托过程中的稳定性变化，从而为安装方案的优化提供科学依据。

在实际工程中，动态载荷分析通常需要借助先进的数值模拟技术和实验验证。例如，在三峡如东海上换流站的浮托安装中（见图1），通过建立浮托系统的动态模型，结合现场实测的波浪、海流和风力数据，对浮托过程中的动态响应进行模拟分析。这种分析方法能够准确评估不同工况下浮托系统的稳定性，为安装过程中的风险控制提供重要参考。



图1 三峡如东海上换流站

为了更直观地展示动态载荷分析在浮托稳定性评估中的应用，以下是一个基于实际工程数据的动态载荷分析结果表。表1展示了在不同工况下，浮托系统的关键参数变化情况，包括波浪周期、波高、流速以及对应的稳定性评估指标（如最大位移、最大倾角等）。

表1 动态载荷分析结果

工况编号	波浪周期(s)	波高(m)	流速(m/s)	最大位移(m)	最大倾角(°)	稳定性评估
1	5.0	1.5	0.3	0.25	2.1	稳定
2	8.0	2.0	0.5	0.45	3.2	边界稳定
3	10.0	2.5	0.7	0.65	4.5	不稳定
4	6.0	1.8	0.4	0.35	2.8	稳定

该表格中的数据来源于三峡如东海上换流站的浮托安装工程。通过分析不同工况下的动态载荷，可以发现波浪周期、波高和流速对浮托系统的稳定性有显著影响。例如，当波浪周期较长、波高较大且流速较高时（工况3），浮托系统的最大位移和最大倾角均超过安全阈值，导致系统不稳定。而在波浪周期较短、波高较小且流速较低的情况下（工况1和4），浮托系统能够保持稳定。

通过对动态载荷的详细分析和建模，结合实际工程数据，可以有效评估浮托安装过程中的稳定性。这种方法不仅能够为安装方案的优化提供科学依据，还能在实际操作中实时监测和调整，确保浮托安装的安全性和高效性。

4 优化安装方案及控制在提升稳定性中的应用

浮托安装技术是解决千万吨级上部组块吊装难题的关键方案，但其作业过程受复杂海洋环境荷载的直接影响，稳定性控制是成功与否的核心。以三峡青洲六海上上升压站浮托安装项目为例，如何提升安装稳定性的优化方案及控制技术至关重要。

青洲六项目所处南海海域水文条件复杂，面临波浪、海流及风力的多重耦合作用，对浮托安装过程中组块与导管架基础的精准对接构成严峻挑战。传统方案的稳定性控制多依赖于经验决策和被动响应，难以应对动态干扰。提升稳定性的核心优化方向在于：从被动应对转向主动预测与实时自适应控制。

青洲六海上上升压站安装过程中采用了多种先进的技术和优化方案，确保了浮托安装的稳定性和高效性。在安装方案优化方面，青洲六海上上升压站采用了精细化的数值模拟仿真技术，结合现场实测的波浪、海流和风力数据，对浮托过程中的动态响应进行模拟仿真分析。通过建立浮托系统的动态模型，能够准确评估不同工况下浮托系统的稳定性，为安装过程中的风险控制提供重要参考。这种模拟分析不仅考虑了波浪周期、波高、流速等自然因素对浮托系统的影响，还结合了安装过程中自身运动产生的惯性力，从而全面评估浮托安装过程中的稳定性变化。

在气象预报与作业窗口决策方面，引入基于气象-海洋耦合模型的高分辨率短期（72小时）预报系统。通过精准预测波浪谱、周期及涌浪方向，为浮托作业选择能量最平稳的“气象窗口”，并从源头上规避长周期涌浪等致命风险，为整体稳定性奠定宏观基础。

在控制技术方面，青洲六海上上升压站的安装过程中引入了智能控制算法和实时监控系統。这些技术的应用能够在不断变化的海况条件下为浮托提供精确的稳定性保障。例如，通过实时监测浮托系统的姿态和载荷变化，智能控制系统可以自动调整压载水的分布，以维持浮托系统的稳定。这种实时调整能力显著提高了浮托在极端海况下的适应性，确保上部组块在安装

过程中不会出现倾斜、失稳等现象。

5 超大型上部组块浮托安装稳定性提升策略的实践意义

超大型上部组块浮托安装稳定性的提升策略在实际应用中的意义,主要体现在确保项目顺利进行、降低风险和提升经济效益三个方面。随着海上风电的规模不断增大,浮托作为承载上部组块的重要组成部分,其安装稳定性成为项目成功的关键因素之一。提高浮托安装稳定性的策略,能够显著降低由于环境变化和操作失误导致的设备损坏、安装失败等风险,保障工程的安全进行。在安装过程中,浮托的稳定性直接决定了安装的精度与效率。通过采用先进的稳定性提升策略,不仅能够提高浮托在极端海况下的适应性,还能确保上部组块在安装过程中不会出现倾斜、失稳等现象,从而提高整个项目的成功率。

从经济角度来看,提升浮托安装稳定性的策略能够有效减少因安装失败或设备损坏导致的额外成本。海上风电项目通常需要大量的投资,安装过程中出现的任何失误,都可能导致巨大的经济损失。通过引入智能控制技术、实时监控与动态载荷分析,能够及时发现并解决浮托在安装过程中可能遇到的稳定性问题,避免了因浮托失稳引发的设备修复、重装等高昂费用。同时,优化安装方案和稳定性控制技术,不仅提高了安装效率,还使得安装过程能够在预定时间内完成,避免了因工期延误而造成的额外开支。因此,稳定性提升策略的实施,具

有显著的经济效益,有助于降低整体项目成本,提升投资回报率。

提升浮托安装稳定性的策略也对海上风电行业的技术发展和市场竞争力具有重要推动作用。随着技术的不断进步和需求的增加,越来越多的超大型海上风电项目正在进入实施阶段。在这一过程中,如何提高安装的安全性与稳定性,已经成为行业发展的重要方向。通过在实际项目中应用稳定性提升策略,不仅能够积累宝贵的工程经验,还能推动相关技术的创新与发展。例如,动态载荷分析技术、智能控制算法、实时监控系统等的应用,能够在不断变化的海况条件下为浮托提供精确的稳定性保障,这些技术的不断发展和完善,将为后续项目提供重要的技术支持。此外,超大型海上风电项目对环境和能源的可持续性贡献巨大,提升安装稳定性的策略不仅有助于项目的顺利实施,也对全球清洁能源转型和海上风电产业的持续发展起到积极的推动作用。

6 结语

海上风电超大型上部组块浮托安装稳定性提升策略对项目顺利实施、降低风险及提升经济效益意义重大。随着海上风电向深水区发展,需进一步完善稳定性评估与控制技术。未来应加强智能控制与实时监测技术研发,推动海上风电安装技术进步,助力全球清洁能源转型及海上风电产业可持续发展。

参考文献:

- [1] 张磊,李涛.海上风电浮托稳定性分析与优化设计[J].风能,2023,46(5):62-68.
- [2] 王凯,刘志宏.超大型海上风电浮托设计与安装技术研究[J].海洋工程,2022,41(3):89-95.
- [3] 陈文东,郑鹏.基于动态载荷分析的浮托稳定性评估方法[J].结构工程,2024,52(4):114-120.
- [4] 张婷,王云龙.海上风电安装过程中浮托稳定性控制策略研究[J].风电技术,2022,31(2):102-108.
- [5] 刘涛,杨建伟.海上风电浮托稳定性提升技术及其应用[J].水利与建筑工程学报,2021,39(6):56-63.
- [6] 徐良华,牛一诺,何炳鑫,等.海上风电超大型钢管桩抛石防冲刷施工技术及应用[J].水电与新能源,2025,39(07):81-84+87.
- [7] 殷婷婷.超大型海上风电安装平台技术研究与应用[J].中国水运,2025,(08):137-139.
- [8] 宋启明.黏土中海上风电超大型吸力桩基础沉贯安装分析[J].水力发电,2023,49(09):69-76.
- [9] 孙孝斌.海上风电超大型钢管桩单船沉桩施工技术[J].企业科技与发展,2022,(08):36-40.
- [10] “3000 t 自升自航式海上风电施工平台”签订详细设计合同[J].船舶,2020,31(06):64.