

海上风电场基础结构设计与施工关键技术研究

杨帆

中船浩鸿风电工程技术(宁波)有限公司天津分公司 天津 300452

摘要: 海上风电场的基础结构是支撑风电机组安全稳定运行的关键环节,其设计与施工直接关系到整个风电项目的经济性、安全性与服役寿命。本文系统梳理了当前主流海上风电基础结构类型(包括单桩、导管架、重力式、吸力桶及漂浮式基础),深入分析了其适用条件、设计原理与力学特性;重点探讨了在复杂海洋环境(如波浪、海流、地震、冲刷等)作用下基础结构的设计方法与关键技术;详细阐述了海上风电基础结构的施工流程、装备需求与安装工艺;并对当前面临的技术挑战(如深水适应性、地质不确定性、腐蚀防护、运维成本等)进行了剖析。最后,展望了海上风电基础结构未来的发展方向,包括智能化设计、模块化施工、新材料应用及漂浮式风电技术突破等,以期为我国海上风电产业的高质量发展提供理论参考与技术支撑。

关键词: 海上风电;基础结构;结构设计;施工技术;海洋环境;漂浮式基础

引言

相较于陆上风电,海上风电具有风速高、湍流小、不占用土地资源、靠近负荷中心等显著优势,近年来呈现爆发式增长态势。然而,海上风电工程环境远比陆上复杂,其建设面临着高盐雾、强腐蚀、大风浪、复杂海床地质等多重挑战。其中,基础结构作为连接风机塔筒与海底地基的承重构件,不仅要承受风机运行产生的巨大动态荷载(包括风荷载、波浪荷载、海流荷载、地震荷载以及风机自身运行引起的疲劳荷载),还需抵御长期海洋环境侵蚀,确保整个风电场在其25年以上的服役期内安全可靠运行。因此,基础结构的设计合理性与施工质量直接决定了海上风电项目的成败。

1 海上风电基础结构类型及适用性分析

1.1 固定式基础

(1)单桩基础:单桩基础是最成熟、应用最广泛的上海风电基础形式,尤其适用于水深小于30米的浅海区域。其结构简单,由一根大直径(通常4-8米)、壁厚较大的钢管桩直接打入海床而成。优点包括制造与安装工艺成熟、施工周期短、成本相对较低。缺点是对海床地质要求较高(需具备足够承载力),且在较深水域或软弱土层中经济性显著下降^[1]。(2)导管架基础:导管架基础由多根斜撑与主腿构成的空间桁架结构,通常适用于水深30-60米的海域。其通过多点支撑分散荷载,对地基承载力要求较低,适用于较软弱或不均匀地基。导管架基础刚度大、抗疲劳性能好,但结构复杂、钢材用量大、制造与安装成本高,需大型起重船配合安装。(3)重力式基础:重力式基础依靠自身重量抵抗倾覆力矩,通常由混凝土或钢-混凝土复合结构构成,底部设有扩

大底板。适用于水深小于30米、海床承载力较高的区域(如岩石或密实砂土)。其优点是无需打桩,对海床扰动小,但自重大、运输困难,且对地基平整度要求高。

(4)吸力桶基础:吸力桶基础是一种新型沉贯式基础,由倒扣的钢制圆筒构成,通过抽真空形成负压将其嵌入海床。适用于软黏土或粉砂地层,具有安装快速、可重复使用、环境扰动小等优点。

1.2 漂浮式基础

随着风电开发向深远海推进(水深>60米),固定式基础因经济性急剧恶化而难以适用,漂浮式基础成为必然选择。其通过系泊系统(锚链或合成缆)将浮体结构锚固于海床,风机安装于浮体之上。主流形式包括:(1)半潜式:稳定性好,适用水深广(50-1000米),但吃水较深;(2)张力腿式:垂向运动小,适合高精度风机运行,但系泊系统张力大,安装复杂;(3)单柱式:重心低、稳性好,但吃水极深(>100米),运输困难。漂浮式风电目前仍处于商业化初期,成本高、技术复杂,但代表未来发展方向。

2 基础结构设计关键技术

2.1 荷载分析与组合

海上风电基础结构的设计必须综合考虑多种荷载的耦合作用及其随时间变化的动态特性。环境荷载是设计中的主导因素,包括由大气边界层引起的风荷载、由海面波动产生的波浪荷载、持续流动的海流荷载,以及在特定海域可能出现的冰荷载或地震作用。与此同时,风机运行过程中叶片旋转、偏航调整、变桨控制等动作会引发复杂的动态推力、弯矩和扭矩,这些荷载具有高频、随机和累积疲劳效应的特点^[2]。此外,施工阶

段的打桩冲击、吊装振动、运输颠簸等临时荷载亦不可忽视。设计过程中需依据国际规范如DNV-ST-0126、IEC 61400-3等,对极限状态(ULS)和疲劳极限状态(FLS)分别进行验算,并采用合理的荷载组合系数,确保结构在全生命周期内的安全性与耐久性。

2.2 地基-结构相互作用

基础与海床土体之间的相互作用是决定结构整体响应的关键环节。对于单桩基础,工程中普遍采用p-y曲线法模拟土体在水平荷载作用下的非线性反力特性,该方法通过一系列弹簧单元反映土体刚度随位移的变化规律。而对于导管架等群桩结构,则需建立三维有限元模型,综合考虑桩-土-桩之间的群效应、土体各向异性及循环荷载下的弱化行为。在软土地区,长期固结沉降与循环荷载引起的孔隙水压力累积可能导致土体强度退化,进而影响基础的长期稳定性。因此,精确表征土体本构关系、合理设定边界条件,并结合原位测试数据进行模型校准,是提升设计精度的核心所在。

2.3 冲刷防护设计

在波浪与海流的持续作用下,基础周围水流加速并形成漩涡,极易引发局部冲刷,导致基础有效埋深减小、承载力下降甚至失稳。冲刷深度受水动力条件、基础几何形状及海床土质等多种因素影响,预测难度较大。为应对这一问题,工程中常采用抛石护底、铺设土工织物防冲垫或在基础底部加装裙板等措施。抛石层通过增加水流阻力和覆盖海床表面,有效抑制泥沙起动;防冲垫则兼具过滤与防护功能,适用于精细化施工场景;而裙板可通过改变流场结构削弱漩涡强度。设计阶段需基于物理模型试验或数值模拟预测最大冲刷深度,并据此确定基础入土深度或配置相应防护措施,确保结构在极端工况下的安全裕度。

2.4 疲劳寿命评估

由于风机在25年以上的服役期内将持续经历数百万次荷载循环,疲劳损伤成为基础结构特别是焊缝区域的主要失效模式。疲劳寿命评估通常基于雨流计数法从时程荷载中提取应力幅值谱,再结合材料或焊接接头的S-N曲线,利用Miner线性累积损伤理论计算总损伤值。然而,实际海洋环境中腐蚀、残余应力、制造缺陷等因素会显著加速疲劳裂纹萌生与扩展。因此,现代设计不仅关注名义应力,更强调细节构造优化(如平滑过渡、消除应力集中)、高质量焊接工艺控制以及腐蚀-疲劳耦合效应的综合考量。近年来,基于断裂力学的损伤容限方法也逐步引入,为高风险部位提供更精准的寿命预测。

2.5 腐蚀与防护

海洋环境中的高盐度、高湿度及微生物活动对钢结构构成严重腐蚀威胁。电化学腐蚀是主要机制,尤其在潮差区和飞溅区,干湿交替加剧了腐蚀速率。为保障结构长期服役性能,工程中普遍采用多重防护策略。高性能防腐涂层(如环氧玻璃鳞片漆)作为第一道屏障,可有效隔绝水分与氧气;牺牲阳极阴极保护(SACP)通过锌或铝合金阳极的优先溶解提供电子,使钢结构成为阴极而免受腐蚀;在大型或关键项目中,外加电流阴极保护(ICCP)系统则通过外部电源主动调控保护电位,实现更均匀、持久的防护效果。设计时需综合考虑涂层寿命、阳极消耗速率、电流分布均匀性等因素,确保在整个设计寿命期内防护系统持续有效。

3 基础结构施工关键技术

3.1 施工流程概述

海上风电基础的施工是一项高度集成化的系统工程,涉及勘察、制造、运输、定位、安装、连接与防护等多个环节。施工前需开展详细的海洋地质与水文调查,为设计与施工方案提供依据。基础结构在岸上预制完成后,由专用运输船运抵风电场址。抵达现场后,依靠动力定位(DP2或DP3级)系统实现精确定位,随后进行就位与沉贯作业。对于单桩或导管架桩腿,通常采用大型液压打桩锤实施冲击贯入;吸力桶基础则通过负压泵系统实现无冲击下沉。安装完成后,导管架与过渡段之间的环形间隙需注入高强灌浆料以实现荷载有效传递。最后,实施防冲刷处理并进行水下检测验收,确保基础满足设计要求。

3.2 关键施工装备

高效可靠的施工装备是保障海上风电基础安装质量与进度的核心。大型液压打桩锤如MENCK MHU 3000,打击能量可达3000 kJ,能够满足大直径单桩及导管架桩腿的贯入需求。自升式风电安装船(WTIV)集运输、吊装、打桩、人员住宿于一体,代表如“龙源振华叁号”,其起重能力达2500吨,作业水深超50米,是当前主流安装平台。此外,铺缆船负责阵列电缆与送出电缆的敷设,遥控无人潜水器(ROV)则用于水下结构检查、灌浆监测及冲刷评估^[3]。随着项目向深远海延伸,对装备的起重能力、抗风浪性能及自动化水平提出了更高要求。

3.3 安装精度控制

基础顶法兰的安装精度直接关系到上部塔筒与机舱的对接质量。通常要求水平度偏差不得超过0.2度,平面位置偏差控制在0.5米以内。为实现这一高精度目标,施工中需融合全球导航卫星系统(GNSS)、超短基线

(USBL)或长基线(LBL)声学定位系统,并结合实时姿态传感器与反馈控制系统。在打桩或下沉过程中,通过连续监测基础姿态并动态调整锤击能量或负压参数,确保最终就位满足设计公差。近年来,数字孪生与BIM技术的应用进一步提升了安装过程的可视化与可控性。

3.4 水下灌浆技术

在导管架基础中,过渡段与桩腿之间的环形间隙需填充高强无收缩灌浆料,以形成刚性连接并传递弯矩与剪力。该过程通常在水下数十米深处进行,环境复杂,对材料性能与施工工艺要求极高。灌浆料需具备高流动性、早强性、微膨胀性及良好的水下抗分散能力。施工时需严格控制灌浆压力、流速与温度,防止产生空洞、离析或冷缝^[4]。同时,借助ROV搭载的摄像头与传感器对灌浆过程进行全程监控,确保填充密实、界面粘结良好。灌浆质量直接决定结构整体刚度与疲劳性能,是施工控制的关键节点。

4 当前面临的关键技术挑战

尽管海上风电基础技术已取得显著进展,但在深水化、大型化、复杂地质等新背景下,仍面临诸多挑战。首先,随着开发水深突破50米,传统单桩经济性急剧恶化,导管架成本陡增,亟需发展轻量化、高效率的新型基础形式。其次,我国近海广泛分布软土、淤泥、孤石乃至浅层气等不良地质,显著增加了基础设计的不确定性与施工风险,需加强原位测试与数值反演技术。第三,15 MW以上超大型风机的普及使得塔筒更高、荷载更大,对基础刚度、阻尼特性及疲劳性能提出前所未有的要求,现有设计方法亟待升级。第四,基础结构占项目总投资比重高达20%–30%,如何通过标准化、模块化、智能制造等手段降低全生命周期成本,是行业可持续发展的关键。最后,漂浮式风电虽前景广阔,但其系泊系统可靠性、动态电缆疲劳、平台-风机-控制系统的强耦合等问题尚未完全解决,距离大规模商业化仍有距离。

5 未来发展趋势

面向未来,海上风电基础技术将朝着智能化、绿色化、深远海化方向加速演进。基于BIM与GIS的协同设

计平台将实现多专业集成与全生命周期管理,人工智能驱动的参数化优化可快速生成最优结构方案,数字孪生技术则为施工监控与运维决策提供实时支持。在材料方面,超高性能混凝土(UHPC)、纤维增强复合材料(FRP)等新型材料有望在减轻自重、提升耐久性方面发挥重要作用。施工模式将向模块化、标准化转变,推动“岸上预制—海上快速拼装”的高效建造体系。漂浮式风电将在未来十年迎来规模化突破,GW级项目陆续落地,带动系泊、动态电缆、运动抑制等配套技术成熟。同时,绿色低碳理念将贯穿施工全过程,电动打桩设备、氢能动力船舶、可回收基础等创新技术将助力海上风电实现真正的零碳开发。

6 结语

海上风电基础结构作为连接风机与海洋的关键纽带,其设计与施工技术直接决定着风电场的安全性、经济性与可持续性。当前,单桩与导管架基础在浅近海已实现规模化应用,但在深水、复杂地质及大型化风机背景下,仍面临诸多技术挑战。未来,应聚焦于基础结构的轻量化、智能化、标准化与深远海适应性,大力发展漂浮式风电技术,推动新材料、新工艺、新装备的集成创新。同时,加强产学研用协同,建立完善的规范标准体系与风险评估机制,是我国海上风电实现从“跟跑”到“领跑”跨越的关键路径。唯有攻克基础结构这一“卡脖子”环节,方能真正释放我国18000公里海岸线蕴含的巨大海上风电潜能,为国家能源转型与“双碳”目标提供坚实支撑。

参考文献

- [1]周晶晶.海上风电风机基础选型对比与分析[J].船舶标准化工程师,2025,58(05):109-112.
- [2]赵彦贤,刘孝刚.海上风电基础结构选型与施工工艺探讨[J].全面腐蚀控制,2025,39(11):178-180.
- [3]王小龙.海上风电大直径钢管桩单桩基础施工技术研究[J].工程机械与维修,2025,(05):102-104.
- [4]张晓斐.海上风电多桩导管架基础嵌岩施工技术综述[J].港口航道与近海工程,2025,62(06):130-135.