

海上风电基础结构设计与施工技术研究

于 靖

中国三峡新能源（集团）股份有限公司 北京 100010

摘要：随着全球能源结构向清洁低碳转型，海上风电作为重要的可再生能源形式，其基础结构设计与施工技术成为制约产业发展的关键因素。本文系统分析了海上风电基础结构的类型与适用性，结合工程案例探讨设计优化策略与施工工艺创新，提出基于多学科协同的智能化设计方法及全生命周期施工管理框架。研究结果表明，通过结构-地质-环境耦合分析、模块化施工技术及智能监测系统的应用，可显著提升基础结构的承载效率与施工安全性，为海上风电向深远海规模化开发提供技术支撑。

关键词：海上风电；基础结构；设计优化；施工技术；全生命周期管理

1 引言

1.1 研究背景与意义

全球能源转型背景下，海上风电凭借风能资源稳定、发电效率高、不占用陆地资源等优势，成为实现“双碳”目标的重要路径。截至2024年，全球海上风电累计装机容量突破60GW，中国以37.7GW的装机规模领跑全球市场。然而，随着开发海域向深远海延伸，海上风电基础结构面临复杂地质条件、极端环境载荷及高成本等挑战^[1]。基础结构作为连接风机与海床的关键部件，其设计合理性直接影响工程安全性和经济性，施工技术的可靠性则决定项目进度与质量。本文聚焦海上风电基础结构设计与施工技术的关键问题，通过理论分析、案例研究，提出创新解决方案，为行业技术升级提供参考。

1.2 国内外研究现状

欧洲作为海上风电技术发源地，已形成覆盖单桩、导管架、重力式、漂浮式等全类型基础结构的技术体系。丹麦Hornsea3项目采用直径10m的超大直径单桩基础，单桩重量达2000吨，可支撑15MW机组；挪威Equinor开发的HywindTampen漂浮式风电场，通过半潜式平台与动态电缆技术，实现水深300m的稳定运行。中国自2010年启动海上风电开发以来，通过技术引进与自主创新，突破了复杂地质条件下基础结构设计难题。江苏如东项目采用内外双壁复合桩技术，有效解决单桩基础冲刷问题；广东阳江项目应用吸力筒导管架基础，将施工噪音降低至环境允许范围内。

2 海上风电基础结构类型与适用性分析

基础结构选型需综合考虑水深、地质、环境载荷、施工条件及经济性等因素。根据支撑方式差异，可将基础结构分为固定式与漂浮式两大类，其中固定式包括单桩、导管架、重力式、吸力筒等型式。

2.1 固定式基础结构

2.1.1 单桩基础

单桩基础由单根大直径钢管桩构成，通过桩侧摩擦力与桩端承载力传递上部载荷。其优势在于结构简单、施工便捷、成本较低，适用于水深0-40m、地质均匀的海域。江苏如东H2项目采用直径8.2m、壁厚80mm的钢管桩，单桩重量达1200吨，可支撑8MW机组。然而，单桩基础存在以下局限：（1）水深超过40m时，桩径与重量显著增加，导致运输与施工难度激增；（2）软土地基中易发生桩端刺入破坏；（3）海流冲刷可能导致桩周土体流失，影响结构稳定性。针对冲刷问题，可采用抛石防护、仿生草护底或主动式冲刷防护装置。

2.1.2 导管架基础

导管架基础由三根或多根钢管通过桁架连接而成，形成空间刚架结构。其优势在于：（1）通过桁架分摊载荷，可适应更深水域与复杂地质；（2）施工噪音低，对海洋生态影响小；（3）模块化设计便于运输与安装。广东阳江中广核项目采用四腿导管架基础，水深35m，单台重量1800吨，通过吸力筒锚固技术将施工噪音控制在155dB以下。但导管架基础存在钢材用量大、焊接质量要求高、防腐成本高等问题。

2.1.3 重力式基础

重力式基础依靠自重抵抗倾覆力矩，通常采用钢筋混凝土沉箱结构。其优势在于结构简单、施工工艺成熟，适用于水深0-20m、地基承载力高的海域。英国Vindeby风电场采用重力式基础，沉箱尺寸为12m×12m×8m，自重达1200吨^[2]。然而，重力式基础体积庞大，运输与安装成本高，且对地基不均匀沉降敏感，需通过防冲刷裙摆或压载块调整重心。

2.1.4 吸力筒基础

吸力筒基础由薄壁钢管构成，通过抽真空产生负压实现下沉与锚固。其优势在于：（1）无需打桩，施工噪音低；（2）可重复使用，降低全生命周期成本；（3）适应软土地基与倾斜海床。德国BorkumRiffgrund2项目采用三筒吸力筒基础，单筒直径15m，下沉深度20m，通过智能控制系统实现精准定位。但吸力筒基础对土体渗透性敏感，需通过土工离心模型试验优化设计参数。

2.2 漂浮式基础结构

漂浮式基础通过系泊系统固定于海床，适用于水深超过60m的深远海区域。其核心型式包括半潜式、单柱式（Spar）与张力腿式（TLP）。挪威HywindTampen项目采用半潜式平台，配备三台11MW机组，通过动态压载系统调节吃水深度，实现水深300m的稳定运行。漂浮式基础的关键技术包括：（1）水动力性能优化，降低平台运动响应；（2）系泊系统设计，确保极端海况下的锚固可靠性；（3）动态电缆技术，适应平台六自由度运动。

3 海上风电基础结构设计的原则及优化策略

3.1 设计原则

3.1.1 安全性原则

海上风电基础结构作为支撑风电机组的关键部分，其安全性是设计的首要考量。海上环境复杂多变，基础结构必须确保在各种设计荷载作用下，包括极端风况、汹涌海浪、强劲海流、厚冰堆积以及潜在地震等荷载的组合作用下，依然具备足够的安全性和稳定性。这意味着结构不能发生倾覆、滑移、过度沉降等破坏现象，从而保障风电机组在任何情况下都能安全运行，避免因基础结构失效导致的重大安全事故和经济损失。例如，在台风频发区域，基础结构需具备更强的抗风和抗浪能力，通过精确的力学计算和模拟分析，确保在极端天气条件下也能屹立不倒。

3.1.2 耐久性原则

海上风电基础结构长期暴露在恶劣的海洋环境中，面临着海水腐蚀、海生物附着、疲劳荷载等多重挑战。海水中的盐分和氯离子会加速金属结构的腐蚀，海生物的附着会增加结构的荷载并影响水流动力特性，而长期的疲劳荷载则可能导致结构出现裂纹甚至断裂。因此，设计时必须充分考虑结构的耐久性，采取有效的防腐措施，如使用高性能防腐涂料、阴极保护技术等，同时合理设计结构细节，减少应力集中和腐蚀敏感部位，从而延长基础结构的使用寿命，降低后期维护成本。

3.1.3 经济性原则

在满足安全性和耐久性要求的前提下，经济性也是海上风电基础结构设计不可忽视的原则。通过合理选择

基础结构类型，如单桩基础、导管架基础、重力式基础等，根据具体海域的地质、水深等条件进行优化设计；优化结构尺寸和布置方式，减少材料用量；采用先进的施工工艺，提高施工效率，降低施工成本。这些措施有助于实现海上风电场建设的经济效益最大化，推动海上风电产业的可持续发展。

3.1.4 可施工性原则

基础结构设计应充分考虑施工条件和施工工艺的可行性。海上施工环境复杂，受天气、海况等因素影响大，因此设计时应与施工方案紧密结合，合理确定基础结构的尺寸、重量和运输方式。避免因设计不合理导致施工困难或无法施工的情况发生，如结构尺寸过大无法运输，或重量过重导致施工设备无法承载等。同时，设计时还应考虑施工过程中的安全性和效率，确保施工过程顺利进行，减少施工风险和成本。

3.2 优化策略

基础结构设计需遵循“安全、经济、适用”原则，通过多学科协同优化实现结构性能与成本的平衡。

3.2.1 结构-地质-环境耦合分析

传统设计方法将地质条件与环境载荷分开考虑，易导致结构冗余或安全隐患。耦合分析方法通过建立三维地质模型与环境载荷数据库，实现结构响应的精准预测。例如，丹麦Ørsted公司开发的“DigitalTwin”平台，集成地质雷达扫描、波浪数值模拟与结构有限元分析，可提前识别桩基沉降风险，优化桩径与埋深参数。

3.2.2 疲劳寿命优化

海上风机基础承受风、波浪、潮流等多向动态载荷，疲劳损伤是主要失效模式。设计阶段需通过雨流计数法与Miner线性累积损伤理论评估疲劳寿命，并采用以下优化措施：（1）增加关键节点焊缝厚度，降低应力集中系数；（2）应用高强钢材（如S460M、S500M）减轻结构自重；（3）采用拓扑优化技术消除冗余材料。英国DoggerBank项目通过拓扑优化将导管架节点重量降低15%，疲劳寿命延长至25年。

3.2.3 防腐与防护设计

海洋环境的高盐、高湿特性导致钢结构腐蚀速率达0.1-0.3mm/年。防腐设计需采用“涂层+阴极保护”的复合方案：（1）涂层系统选用环氧富锌底漆（干膜厚度 $\geq 80\mu\text{m}$ ）+环氧云铁中间漆（干膜厚度 $\geq 120\mu\text{m}$ ）+脂肪族聚氨酯面漆（干膜厚度 $\geq 60\mu\text{m}$ ），总干膜厚度 $\geq 260\mu\text{m}$ ；（2）阴极保护采用牺牲阳极（如铝合金、锌合金）或外加电流法，保护电位需满足-0.85V至-1.10V（相对于Ag/AgCl参比电极）。此外，需在桩周设置防冲刷保

护层,如抛石护底、混凝土护圈或仿生草垫^[3]。

4 海上风电基础施工关键技术

施工技术的可靠性直接影响项目进度与成本。针对深远海施工条件,需创新模块化、智能化施工工艺。

4.1 单桩基础施工

单桩施工流程包括运输、定位、沉桩与防护四个阶段。(1)运输:采用半潜船或驳船运输,通过绑扎系统固定钢管桩,防止运输过程中滚动或滑动;(2)定位:利用GPS-RTK与声呐定位系统,将打桩船定位精度控制在±0.1m以内;(3)沉桩:采用液压冲击锤(如MenckMHU4000S)进行锤击沉桩,通过实时监测贯入度与锤击数控制施工质量。江苏如东项目单桩沉桩平均耗时72小时,较传统方法缩短40%;(4)防护:采用导管式抛石船进行精准抛填,碎石粒径控制在2.5-40cm,填充率达60%。

4.2 导管架基础施工

导管架施工采用“岸上预制+海上安装”模式。

(1)岸上预制:在专用码头完成导管架分段焊接与防腐处理,通过超声波探伤(UT)与磁粉检测(MT)确保焊接质量;(2)海上安装:利用浮吊将导管架吊装至预定位置,通过吸力筒下沉技术实现精准锚固。广东阳江项目导管架安装周期较传统打桩法缩短60%,噪音控制在155dB以内^[4]。

4.3 漂浮式基础施工

漂浮式基础施工包括平台组装、系泊系统安装与动态电缆铺设三个环节。(1)平台组装:在岸上完成平台主体、压载系统与发电设备的集成,通过水密性试验验证结构密封性;(2)系泊系统安装:采用ROV(遥控潜水器)辅助安装锚链与吸力锚,确保系泊张力满足设计要求;(3)动态电缆铺设:应用张力控制铺缆船,通过实时监测电缆张力与弯曲半径防止过度拉伸或扭绞。挪威HywindTampen项目动态电缆铺设效率达3km/天,较传统方法提升50%。

5 案例分析:江苏如东H2项目基础结构创新实践

5.1 项目概况

江苏如东H2项目位于江苏省如东县近海,水深12-18m,安装40台8MW风电机组,总装机容量320MW。项目采用单桩基础型式,桩径8.2m,壁厚80mm,单桩重量1200吨。

5.2 设计创新

(1)内外双壁复合桩技术:针对单桩基础冲刷问题,在桩周设置外径9.2m、壁厚20mm的副桩,通过注浆

形成复合结构,将抗冲刷能力提升3倍;(2)智能监测系统:在桩身布置应变计、加速度计与倾斜仪,实时监测结构应力与变形,数据传输至岸上控制中心进行疲劳寿命评估。

5.3 施工优化

模块化运输:将钢管桩分段预制,通过岸上焊接完成整体组装,运输效率提升40%;自动化沉桩:采用MenckMHU4000S液压锤与智能导向系统,沉桩精度达±0.05m,单桩施工周期缩短至72小时;生态防护:在桩周设置仿生草护底,减少施工期泥沙扩散,保护海洋生态。

5.4 实施效果

项目投运后,基础结构沉降量控制在50mm以内,疲劳寿命达25年,较传统设计延长10年;单桩施工成本降低至800万元/台,较行业平均水平下降20%;项目度电成本(LCOE)降至0.35元/kWh,具备较强市场竞争力。

结语

海上风电基础结构选型需综合考虑水深、地质与经济性,单桩基础适用于浅水区,导管架与漂浮式基础适用于深远海;通过结构-地质-环境耦合分析、疲劳寿命优化与防腐防护设计,可显著提升基础结构性能;模块化运输、自动化沉桩与智能监测技术的应用,可降低施工成本与风险,提高项目收益。展望未来,随着海上风电向深远海规模化开发,基础结构技术将呈现新趋势,材料创新方面,高强钢材、复合材料与3D打印技术的应用将减轻结构自重、降低制造成本;智能化施工方面,无人机、ROV与数字孪生技术的融合将实现施工过程的实时监控与动态优化;多能互补方面,海上风电与海洋牧场、制氢装置的协同开发将拓展基础结构的功能边界,提升海洋资源利用效率。

参考文献

- [1]刘祺.海上风电风机基础结构型式分析研究[J].中国水运,2025,(02):54-55+95.
- [2]苏惠杰.海上风电风机基础结构形式及安装技术[J].珠江水运,2024,(05):111-113.
- [3]李贝贝,王元清,支新航,等.海上风电基础结构及其防腐蚀研究进展[C]//天津大学,天津市钢结构学会.第二十二届全国现代结构工程学术研讨会论文集.清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室;上海通正铝结构建设科技有限公司,2022:384-389.
- [4]陈建均.海上风电基础施工提质增效路径探索[J].中国电力企业管理,2024,(06):21-23.