

海上风电场建设难点与管控建议

张瑜 帅小根 陈浩 龚武

长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430000

摘要：与陆地风电对比，海上风电不占用土地资源，基本不受地形地貌影响，风速更高，风能资源更丰富，年利用小时数更高的优势。但因海洋特殊施工环境，在工程建设过程中不可避免受到政策、安全、气象等外界因素与施工工艺、设备等多重影响，项目开工建设依然面临诸多问题和挑战。

关键词：海上风电场建设；自然环境挑战；工程技术瓶颈；项目管理与协同；成本管控

引言：截至2025年9月底，全国海上风电累计装机容量达到4461万千瓦，累计并网容量为4420万千瓦。“十五五”规划中提出，海上风电年新增装机容量目标不低于1500万千瓦，以确保2030年风电累计装机容量达到13亿千瓦。受益于国家政策支持、技术进步和市场需求增长。预计到2030年，中国将成为全球最大的风电装机容量国度之一。受政策导向、复杂作业环境与有限的施工资源限制，保障海上风电项目顺利推进，避免或降低上述因素造成的工期、合同、安全等风险，依托长江设计集团自主创新项目(模块化海上升压站的建造关键技术研究及应用(CX2022Z27))对海上风电项目建设期存在的上述制约因素进行分析与对策相应研究。

1 海上风电场建设核心难点分析

1.1 海洋复杂环境带来的自然挑战

海上风电场建设首当其冲面临海洋复杂环境带来的自然挑战。极端天气与水文条件对建设过程形成严重制约。海上强风频繁且风力强劲，在施工阶段，强风会冲击施工设备，影响其稳定性与操作精度，甚至可能损坏设备，导致施工中断。巨浪的涌动不仅使施工船舶难以稳定作业，还会对已安装的基础结构产生强大冲击力，增加结构失稳风险。潮汐的涨落变化也会干扰施工进度，低潮时船舶可能搁浅，高潮时又可能影响部分施工环节的开展^[1]。地质勘察与基础施工的复杂性同样不容忽视。海洋地质条件多样，不同区域地质差异显著，软土、岩石、砂砾等地质类型交错分布。软土地基承载力弱，易发生沉降和变形，给基础施工带来极大困难，需采用特殊处理方式增强地基稳定性。岩石地质则对钻探和爆破作业要求极高，施工难度大、成本高。而且，地质的不均匀性可能导致基础不均匀沉降，影响风机整体稳定性与安全性。海洋生态环境潜在影响也不容小觑。海上风电场建设与运营可能改变海洋生物的栖息环境，影响鱼类、贝类等生物的繁殖、觅食和迁徙。施工过程中的噪

声、振动以及船舶排放等，可能对海洋生态系统造成干扰，破坏生态平衡。

1.2 工程技术实施的关键瓶颈

海上施工装备的适配性与可靠性问题是工程技术实施的关键瓶颈之一。满足海上风电施工要求的专用船舶和装备相对匮乏，现有装备在作业能力、适应海况能力等方面存在不足。在恶劣海况下，部分施工船舶无法正常作业，影响施工进度。风机及关键设备的运输与安装难题也较为突出。大型风机设备体积庞大、重量惊人，海上运输过程中需应对风浪、海流等不利因素，确保设备安全运输至指定位置。安装时，精确的定位和稳定的操作难度大，对施工人员技术水平和施工装备性能要求极高。海底电缆铺设与连接面临技术挑战。海底电缆需在复杂海底地形中铺设，要避免与礁石、沉船等障碍物碰撞。电缆连接环节技术要求严格，需保证连接质量，防止出现漏电、短路等问题，确保电力传输的稳定可靠。

1.3 项目管理与协同的突出矛盾

海上风电场建设涉及多个参与方，协同管理复杂度高。海洋、环保、交通、能源等部门对项目审批和监管要求各异，信息沟通不畅易致审批延误，一个项目审批涉及部门达5-8个，审批周期平均6-12个月。不同参建单位在施工进度、质量标准等方面有差异，协调难度大。施工进度与资源调度的动态冲突常见。海上施工受自然条件影响大，进度难精确把控。资源调度需依施工进度实时调整，但实际常出现资源供应不及时或过剩，影响施工效率，资源供应不及时致施工延误每年达10-15天。海上作业安全管理压力巨大。海上环境恶劣，作业人员面临强风、巨浪、低温等危险，安全风险高。确保作业人员安全，需投入大量人力、物力进行安全防护和应急救援准备，每10名作业人员需配1名专职安全管理人员。

1.4 成本控制的多重阻力

装备投入与运维成本高是成本控制的主要阻力之一。

海上施工装备价格昂贵,购置和维护成本高。风机及关键设备技术复杂,运维过程中需专业技术人员和先进检测设备,运维成本居高不下。不确定性因素导致成本波动频繁。海洋环境变化、地质条件差异、政策调整等因素都可能影响项目成本。例如,恶劣天气可能导致施工延期,增加人工和设备租赁成本;地质条件变化可能需调整施工方案,增加工程费用。

2 基于自然环境挑战的管控建议

2.1 精细化环境勘察与风险预判机制

为有效应对海上风电场建设面临的自然环境挑战,构建精细化环境勘察与风险预判机制至关重要。全周期水文气象与地质监测体系是基础支撑。在项目前期规划阶段,需在拟建风电场区域全面布局监测站点,对风速、风向、波浪高度、周期、潮汐变化等水文气象要素,以及海底地质结构、土壤性质、地质灾害隐患等地质信息进行长期、连续、精准监测。通过收集大量数据,绘制详细的水文气象和地质图谱,为后续设计和施工提供科学依据。在建设运营阶段,持续监测环境变化,及时掌握动态信息,以便根据实际情况调整施工方案和运维策略。极端环境下的风险评估与预警模型是关键环节。基于全周期监测数据,运用先进的数据分析技术和数学模型,对极端天气和地质灾害发生概率及影响程度进行评估。例如,针对台风,分析其路径、强度、影响范围等,预测可能对风电场造成的破坏。同时,建立预警模型,设定不同等级的预警阈值。当监测数据达到或超过阈值时,及时发出预警信息,为项目各方采取应对措施争取宝贵时间,降低损失。

2.2 生态保护与工程建设的协同策略

实现生态保护与工程建设协同发展是海上风电场可持续发展的必然要求。对于生态敏感区,制定施工优化方案是首要任务^[2]。在施工前,对生态敏感区进行详细调查,明确保护对象和范围。根据调查结果,调整施工布局 and 工艺,尽量减少对敏感区的占用和干扰。例如,避开鱼类繁殖期和鸟类迁徙路线进行施工,采用对海洋生物影响较小的施工设备和方法。施工过程中的生态影响减缓措施也不可或缺。在施工过程中,采取有效措施减少噪声、振动和污染物排放。例如,选用低噪声施工设备,设置隔音屏障;对施工废水进行净化处理后再排放;对施工过程中产生的废弃物进行分类收集和妥善处理,避免对海洋生态环境造成污染。

3 工程技术实施的管控优化路径

3.1 施工装备的升级与适配管理

(1) 专用装备的研发与应用保障机制。专用装备研

发需紧扣工程实际需求,建立产学研用协同联动模式。联合高校科研机构拆解技术参数,针对复杂工况制定个性化研发方案,重点突破核心部件可靠性与作业效率瓶颈。应用阶段搭建全流程保障体系,前期开展小范围试作业,试作业时长可达1-2个月,实时采集运行数据优化参数设置。中期组建专业技术团队驻场跟踪,团队人数可达5-10人,同步完善操作规范与培训手册。后期建立装备性能评估档案,将应用反馈及时反哺研发环节,形成研发与应用的闭环管理,确保装备与工程需求高度契合。(2) 装备运维与故障应急处理体系。装备运维推行预防性维护模式,依据装备运行周期与工况特点制定分级维护计划,维护周期可分为每日、每周、每月等不同级别。采用物联网技术搭建实时监控平台,动态捕捉设备运行参数,提前预警潜在故障风险,可提前1-3天预警。故障应急处理体系需明确响应流程与责任分工,建立备品备件智能仓储系统,通过大数据分析预判易损部件消耗规律,保障备件及时供应,备件库存数量可根据设备数量和使用频率确定,一般可储备常用备件50-100件。组建快速抢修队伍,队伍人数可达10-20人,定期开展实战化演练,每年演练次数可达3-5次,优化故障诊断与修复流程,最大限度缩短停机时间,保障施工连续性,故障修复时间可缩短至2-4小时。

3.2 关键工程环节的技术管控措施

(1) 风机运输与安装的标准化流程构建。风机运输环节需结合运输路线特点制定专项方案,对道路桥梁进行承载力评估,采用模块化运输方式减少装卸次数。安装流程推行全工序标准化管理,前期完成基础平整度与强度检测,精准定位安装基准。过程中采用自动化吊装设备,同步搭建三维监测系统,实时校正安装精度。后期开展多维度检测,包括紧固力矩校验与运行参数调试,确保每道工序符合技术规范,提升风机安装质量与稳定性。(2) 海底电缆施工的质量控制与防护方案。海底电缆施工前开展详细地质勘察,明确海床地形与水文条件,据此优化路由设计。质量控制聚焦电缆敷设精度与接头工艺,采用专用敷设船配备动态定位系统,避免电缆拖拽损伤。接头处理推行无尘化操作环境,应用超声波检测技术确保接头密封性能。防护方案结合海洋环境特点,在易受冲刷区域设置防护套管,同步建立海底监测网络,实时监测电缆运行状态与周边环境变化,及时处置潜在风险。

3.3 技术创新与成果转化的推动机制

建立多元化创新投入机制,整合企业资金与政府专项扶持资源,重点支持前沿技术研发。搭建创新成果交

流平台,定期组织技术研讨会促进经验共享。完善成果转化激励政策,明确研发人员与转化团队激励标准,激发创新积极性^[3]。构建中试孵化体系,为新技术提供工程化验证场景,加速技术成熟度提升。建立成果推广机制,结合不同工程特点制定个性化推广方案,推动创新技术快速落地应用,形成技术创新与工程实践相互促进的良性循环。

4 项目管理与成本管控的综合策略

4.1 多维度协同管理体系建设

在海上风电场项目推进过程中,多维度协同管理体系建设是保障项目顺利实施的关键。参与方协同的信息共享平台搭建是重要基础。海上风电场项目涉及业主、设计单位、施工单位、监理单位等多方参与,各方信息传递不畅易导致沟通成本增加、工作效率低下。搭建统一的信息共享平台,将项目规划、设计图纸、施工进度、质量检测等各类信息实时上传共享,信息更新频率可达每日1-2次,打破信息壁垒,让各方能及时获取所需信息,依据准确数据做出科学决策,提升项目协同效率。跨部门协调机制与责任划分方案同样不可或缺。海上风电场项目涵盖多个部门,不同部门工作目标与侧重点存在差异,易出现工作衔接不畅、责任推诿等问题。建立跨部门协调机制,定期召开协调会议,每年召开会议次数可达10-15次,及时解决部门间矛盾与问题。同时制定详细责任划分方案,明确各部门在项目各阶段职责与权限,做到责任到人,确保项目各项工作有序推进。

4.2 安全与进度的动态管控方法

海上作业安全风险的全流程管控是项目安全保障的核心。海上环境复杂多变,作业过程中面临风浪、潮汐、地质等多种风险。从项目筹备阶段开始,对海上作业进行全面风险评估,识别潜在风险点,制定针对性防控措施。在施工过程中,实时监测风险变化,根据实际情况调整防控策略,确保安全风险始终处于可控状态。基于

动态计划的进度调整与保障措施是确保项目按时完成的关键。海上风电场项目受天气、海况等因素影响大,施工进度易出现波动。制定动态计划,根据实际施工情况与外部环境变化,及时调整施工进度安排。同时采取增加资源投入、优化施工工艺等保障措施,弥补进度延误,确保项目按计划推进。

4.3 全生命周期成本优化管控

前期规划阶段的成本测算与控制是全生命周期成本管控的起点。在项目规划阶段,对项目建设成本、运维成本等进行详细测算,结合市场行情与项目实际情况,制定合理成本预算。通过优化项目选址、设备选型等方案,降低项目初始投资成本。施工与运维阶段的成本节约策略是全生命周期成本管控的重点。在施工阶段,加强施工管理,提高施工效率,减少施工浪费,降低施工成本。在运维阶段,采用智能化运维技术,实时监测设备运行状态,提前发现设备故障隐患,及时进行维护保养,延长设备使用寿命,降低运维成本。

结束语

海上风电场建设难点众多,涵盖自然环境、工程技术、项目管理及成本等多个层面。通过构建精细化环境勘察与风险预判机制、升级施工装备与技术管控、建设多维度协同管理体系以及实施全生命周期成本优化管控等策略,能够有效应对这些难点。各方需共同努力,将这些管控建议落到实处,提升海上风电场建设水平,推动海上风电产业持续进步。

参考文献

- [1]屈冲,闫建国,覃涛,等.最佳运维时间窗的海上风电场维护优化策略[J].太阳能学报,2025,46(8):141-150.
- [2]李伟,王海云.全直流海上风电场建设的机组用电方案研究[J].现代电子技术,2023,46(1):176-180.
- [3]牛艺.海上风电场变电站布置问题与策略研究[J].光源与照明,2024(6):159-161.