

# 海上风电技术及其应用分析

文 / 王国锋 华能海南发电股份有限公司清洁能源分公司

**摘要：**海上风电作为可再生能源的重要组成部分，近年来得到了广泛关注和快速发展。随着全球对清洁能源需求的增加，海上风电技术逐步成熟，成为实现可持续发展的关键途径。文章在分析海上风电发展现状的基础上，探讨了海上风电常见施工技术及其应用，并且对其未来发展进行了探讨，希望可以为相关工作者提供参考和借鉴。

**关键词：**海上风电；施工技术；技术应用；发展趋势

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.079

## 引言

随着全球能源结构的转型与可再生能源的广泛推广，海上风电作为一种清洁、可再生的能源形式，正逐渐成为各国能源战略的重要组成部分。海洋广阔的空间和强劲的风资源，使得海上风电具有较陆上风电更高的发电效率和更大的发展潜力。在应对气候变化、降低温室气体排放的背景下，海上风电不仅能够提供稳定的电力供应，还能促进经济发展和技术创新。近年来，海上风电技术的快速发展为其在全球范围内的推广奠定了基础。许多国家纷纷加大投资力度，进行相关技术研发与项目建设，以期在这一领域取得领先地位。然而，海上风电的发展也面临着诸多挑战，包括施工难度、环境影响、成本控制等。因此，对海上风电技术及其应用进行深入分析，显得尤为重要<sup>[1]</sup>。

## 一、海上风电发展现状分析

近年来，海上风电的快速发展引起了全球范围内的广泛关注。根据国际可再生能源署（IRENA）的数据，海上风电的装机容量在过去十年中增长了超过四倍，预计在未来的十年内还将继续加速增长。这一变化不仅反映了技术的成熟与进步，也显示出各国在清洁能源转型方面的决心与行动。海上风电的发展受益于多方面因素。首先，许多国家的政府出台了支持政策和补贴措施，促进海上风电项目的投资与建设。例如，欧盟国家通过设定明确的可再生能源目标，推动了海上风电的规划和实施。其次，技术创新也是海上风电迅猛发展的重要驱动力。现代风电机组的设计不断优化，风机的单机容量逐年增大，使得发电效率显著提高。基础设施的完善、施工技术的进步以及运维管理的智能化，使得海上风电项目的经济性和可靠性得到了有效保障。然而，海上风电的发展同样面临诸多挑战。施工过程中的复杂性和环境影响评估的要求使得项目的实施难度加大。此外，海上风电的高成本问题仍然是制约其进一步发展的瓶颈。尽管技术进步有助于降低单位发电成本，但高昂的初始投资、维护费用及对海洋环境的潜在影响仍需综合考量。因此，行业内亟需在技术创新、成本控制和政策支持等方面进行深入研究，以确保海上风电的可持续发展。

## 二、海上风电技术类型及其应用探讨

### （一）海上风电基础施工技术

海上风电基础施工技术是确保风电机组稳定性和安全性的关键环节，其施工质量直接影响到整个项目的经济效益和运行安全。由于海洋环境的特殊性，海上风电基础的施工面临着诸多挑战，包括复杂的水文气象条件、海洋生物的保护要求以及施工设备的运输和安装等。因此，开发和应用先进的基础施工技术尤为重要。当前，海上风电基础主要分为三种类型：重力式基础、桩基和浮式基础。重力式基础适用于浅水区，其原理是利用自身的重力固定在海床上，施工相对简单，适合于低风速区域。桩基则通过打入海床来提供更强的抗风和抗震能力，适用于深水区或风速较高的区域。随着技术的进步，浮式基础逐渐受到关注，它通过浮筒支撑风机，能够在更深水域中部署，拓展了海上风电的开发范围<sup>[2]</sup>。在基础施工过程中，采用现代化的施工设备和技术是提高施工效率和保证施工质量的有效手段。例如，使用动态定位系统的施工船能够在复杂的海洋环境中精准控制位置，减少施工误差。此外，自动化和智能化的施工技术，如机器人焊接和无人机监测等，能够提高施工的精确度和安全性，降低人工作业的风险。

### （二）海上风电机组布置技术

海上风电机组的布置技术是影响风电场整体发电效率和经济效益的重要因素。合理的机组布置不仅能够提高风能的捕获效率，还能有效减少机组之间的相互干扰，降低维护和运营成本。因此，在进行海上风电项目设计时，机组的布局需综合考虑多种因素，包括风资源分布、海洋环境条件、机组类型以及施工和运维的便利性等。首先，风资源的评估是机组布置的基础。通过对海域内风速和风向的长期监测，可以确定最优的机组布局方案。通常情况下，风电机组应按照一定的间距进行排列，以最大程度地避免“尾流”效应的影响。尾流效应是指风机产生的涡流会对下游风机的发电能力造成影响，因此，在设计时需要确保机组之间的距离足够，以保证每台风机都能有效利用风能。其次，海洋环境的复杂性也对机组的布置提出了挑战。海洋的水深、波浪、潮汐等自然

条件会直接影响到机组的安装和运行。因此，在选择机组位置时，应充分考虑海洋环境的影响，选择适合的机组类型和安装方式。例如，在深水区域，漂浮式风电机组的应用将成为一种有效的解决方案，这种机组的布置方式可以拓展风电开发的海域范围。如图 1 所示。



图 1 漂浮式风电机组

最后，施工与运维的便捷性也是机组布置技术中不可忽视的因素。在设计风电场布局时，应考虑到施工船舶的进出、设备的运输及后期的维护作业。这要求机组布局要有利于形成合理的施工通道，同时在日常运维中也能减少人力和物力的投入，提高工作效率。

### （三）海上风电风机安装技术

海上风电风机的安装技术是确保风电项目顺利进行的关键环节，其安装质量直接关系到风电机组的安全性、稳定性和发电效率。由于海上环境的特殊性，风机的安装过程面临着诸多挑战，如复杂的水文气象条件、强烈的潮汐和波浪等，这要求采用先进的技术和设备来保障安装的精确性与安全性。首先，风机的安装通常需要使用专用的安装船舶，这些船舶配备了高精度的动态定位系统，能够在波浪和潮流的影响下保持稳定的位置。这种技术的应用使得安装过程中的误差大幅减少，确保风机的准确定位。同时，现代安装船舶还具备自动化操作系统，可以实现远程监控和控制，提高安装效率并降低人力成本。其次，风机的安装过程中，基础的准备工作至关重要。在风机安装前，必须对基础进行详细检查，确保其稳定性和承载能力。此外，在风机的提升与固定过程中，通常采用大型起重设备，确保风机组件在吊装过程中的安全与平稳。在这方面，采用模块化设计的风机组件，能够简化安装过程，减少现场作业时间<sup>[3]</sup>。风机的安装还需考虑到环境保护的问题。在施工前，必须进行环境影响评估，以确保安装活动对周围生态环境的影响降到最低。为此，许多企业开始引入绿色施工理念，采用低噪音和低污染的施工技术，尽量减少对海洋生物

的干扰。最后，风机安装完成后，随即进行全面的检测和调试，以确保其正常运行。这一过程包括对电气系统、控制系统及机械部件的全面检查，确保各项指标达到设计要求。通过这些严谨的步骤，可以最大程度地提高风电机组的运行可靠性，为海上风电的可持续发展奠定坚实基础。

### （四）海上风电电缆敷设技术

海上风电电缆敷设技术是连接风电机组与陆地电网的重要环节，其质量直接影响到风电场的整体性能和电力输送的可靠性。由于海洋环境的复杂性和施工条件的严峻性，电缆敷设过程面临诸多挑战，包括水深、潮汐波浪、海底地形以及潜在的环境保护要求等。因此，开发和应用先进的电缆敷设技术显得尤为重要。首先，海上风电电缆的选择与设计至关重要。电缆必须具备良好的耐腐蚀性、绝缘性和抗拉强度，以适应海洋环境的苛刻条件。通常采用的电缆类型包括交联聚乙烯（XLPE）电缆和铅护套电缆，这些电缆能够有效防止海水侵蚀并确保长期稳定运行。在设计过程中，还需考虑电缆的敷设方式和路径，以确保其在运行过程中不受外部因素的影响。其次，电缆敷设技术的实施主要包括海底敷设和陆地连接两个部分。对于海底敷设，常用的方法包括拖曳法、埋设法和明敷法。其中，拖曳法通过专用的敷设船将电缆拖至指定位置，再通过水下机器人或其他设备进行精确定位。而埋设法则利用机械设备将电缆埋入海床，以减少外界干扰和物理损伤。这些方法的选择需根据具体的海域条件和项目要求进行合理评估。最后，电缆的监测与维护也是确保其长期可靠运行的重要环节。现代技术的发展使得在线监测系统得以应用，通过实时监测电缆的温度、压力和电流等参数，可以及时发现潜在的问题，减少故障发生的风险。运维人员还需定期对电缆进行检查，以保证其完好无损。

### （五）海上风电运维技术

海上风电运维技术是确保风电机组长期稳定运行和高效发电的重要保障。由于海上风电场的特殊环境和复杂的气象条件，运维工作的难度和风险相对较高。因此，开发和应用先进的运维技术对于提升海上风电场的整体经济效益和发电能力具有重要意义。首先，海上风电的运维工作主要包括定期巡检、故障检测和维修等环节。传统的人工巡检方式效率低下且存在安全隐患，而现代化的运维技术逐渐引入了无人机、遥感技术和机器人等高科技手段。这些设备能够在恶劣的天气条件下进行快速、准确的巡检，及时发现潜在问题并提供详尽的数据支持。例如，无人机可配备高清摄像头和红外传感器，对风机叶片、塔筒及基础设施进行全面监测，有效提高了检修的精确度和效率<sup>[4]</sup>。其次，数据分析与智能运维

系统的应用也在海上风电运维中逐渐普及。通过安装传感器和监测设备,实时采集风机的运行数据,包括转速、温度、振动等参数。这些数据通过云计算和大数据分析技术进行处理,能够提前预测设备的故障趋势,从而实现预防性维护。这种基于数据驱动的运维模式,不仅降低了维护成本,还延长了设备的使用寿命,提高了风电场的整体运行效率。最后,海上风电运维技术还需重视人员培训与安全管理。由于海上作业的复杂性和潜在危险,运维人员必须接受严格的培训,以掌握必要的专业知识和应急处理能力。同时,企业应制定完善的安全管理制度,确保每位员工在作业过程中的安全,减少事故发生的风险。

### 三、海上风电 发展趋势

#### (一) 海上风电大型化

海上风电大型化是当前全球风电产业发展的重要趋势之一,其核心在于通过提升风电机组的单机容量和整体规模,来实现更高的发电效率和经济效益。随着技术的不断进步,现代风电机组的设计逐渐向着更大功率和更高高度发展,许多国家的风电项目已经开始采用单机容量超过10兆瓦的风机,这一变化不仅提高了每台风机的发电能力,也降低了单位发电成本。大型化的风电机组能够更有效地利用海洋资源。海上风场通常具有较强的风速和稳定的风向,较大的风机能够在相同的风速下捕获更多的风能,从而显著提高发电量。这种高效的能源转换不仅有助于满足日益增长的电力需求,还能为国家的可再生能源目标的实现提供有力支持。随着风电机组规模的扩大,相关技术和设备也在不断升级。例如,为了适应大型风机的安装和维护,风电行业正在开发更为先进的施工船舶和起重设备。这些设备的智能化和自动化程度不断提升,能够在复杂的海洋环境中确保风机的安全安装和高效运维。

#### (二) 海上风电深水化

海上风电深水化是当前风电行业发展的又一重要趋势,随着技术的不断进步,越来越多的风电项目开始向更深的海域延伸。深水风电的核心在于通过开发深水区域的风能资源,来提高整体发电能力和可持续性。深水区域通常具有更为稳定的风速和较少的环境干扰,这为风电机组的高效运行提供了良好的条件。深水化的一个显著优势在于其能够有效避开近海区域的环境限制和竞争压力。随着近海风电场的逐渐饱和,开发深水区域的潜力愈加凸显。深水风电机组可以在水深超过60米的海域部署,这些区域不仅风能资源丰富,而且相对不易受到人类活动的影响,能够减少对海洋生态系统的干扰。

深水风电的技术创新也在不断推动产业的发展,比如浮式风电机组使得在深水区域的风电开发成为可能。

#### (三) 海上风电集约化

海上风电集约化是指在有限的海洋空间内,通过优化资源配置和提高土地利用效率,以实现更高的发电能力和经济效益。这一趋势不仅符合可持续发展的理念,也响应了全球日益增长的能源需求。集约化的发展策略主要体现在机组布置、项目规模和技术整合等多个方面。首先,合理的机组布置是实现集约化的重要手段。通过科学规划风电机组的间距和排列方式,可以最大程度地提高风能的捕获效率,减少机组间的相互干扰。例如,采用先进的计算流体力学模拟技术,可以对风速分布进行精确预测,从而优化风电场的布局,确保每台机组都能充分利用风能资源。其次,集约化还体现在项目规模的扩大。随着技术的不断进步,海上风电项目的单体规模逐渐增大,越来越多的大型风电场被建设。这种规模化发展不仅能够实现规模经济,降低单位发电成本,还能推动相关产业链的协同发展,促进地方经济的增长。在项目融资方面,集约化的大型风电项目通常更具吸引力,能够获得更多的投资和政策支持。最后,集约化发展还需要技术的整合与创新。例如,风电与其他可再生能源的结合,如海洋能、太阳能等,能够形成综合能源系统,提高整体能源利用效率。在运维管理方面,集约化可以通过智能化技术的应用,实现对多个风电场的集中监控与管理,提高运维效率。

#### 结语

综上所述,海上风电技术在近年来取得了显著的发展,成为全球可再生能源转型的重要支柱。通过对海上风电的基础施工、机组布置、风机安装、电缆敷设及运维等技术的深入分析,我们可以看到,这一领域不仅在技术层面不断创新与进步,同时也在政策支持和市场需求的推动下,展现出良好的发展前景。

#### 参考文献

- [1] 葛前华. 海上风电技术与经济分析 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (32): 88-90.
- [2] 赵雄, 岳晓晴, 马璐, 等. 海上风电腐蚀防护技术及应用研究进展 [J]. 装备环境工程, 2024, 21(10): 110-117.
- [3] 曾桢, 王溥, 朱童. 海上风电与光伏发展现状、趋势与未来策略研究 [J]. 科技促进发展, 2024, 20(Z1): 750-760.
- [4] 吴磊. 海上风电技术发展综述 [J]. 机械制造, 2024, 62(10): 1-15.
- [5] 刘亚雯, 杨秋玉, 林贞荣, 等. 基于专利数据的全球海上风电检测技术发展态势与我国发展对策研究 [J]. 中国发明与专利, 2024, 21(08): 38-46.