

陆上风电叶片安装施工技术的优化与创新实践

杨小胜

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司 贵州省毕节市 553100

摘要：陆上风电作为清洁能源发展的关键领域，其建设效率与质量直接影响风电产业的规模化进程。叶片作为风电机组捕获风能的核心部件，其安装施工技术是项目落地的关键环节，直接关系到机组运行安全性、发电效率及全生命周期成本。本文围绕陆上风电叶片安装施工技术的优化与创新实践展开研究，从施工准备阶段的技术改进、叶片吊装技术的优化、安装过程的精准定位技术、叶片连接技术的创新、施工后的检测与维护技术优化五个维度，系统探讨技术升级的理论路径。通过分析提出以精细化准备、精准化操作、可靠化连接、智能化维护为核心的优化策略，旨在提升叶片安装施工的可靠性、安全性与经济性，为陆上风电项目的高效建设提供理论支撑。

关键词：陆上风电；叶片安装；施工技术；优化；创新

1. 引言

在全球能源结构向绿色低碳转型的背景下，陆上风电凭借资源分布广、技术成熟度高、建设成本持续下降等优势，成为可再生能源发展的重要方向。叶片作为风电机组直接捕获风能的“动力器官”，其安装质量直接影响机组的捕风效率、运行稳定性及使用寿命。随着风电机组单机容量不断增大，叶片的重量、刚度及安装精度要求显著提升，传统安装施工技术在应对复杂地形、恶劣天气及大尺寸叶片时逐渐暴露出局限性——如吊装平衡控制难度大、定位精度不足、连接可靠性待强化等问题。因此，针对陆上风电叶片安装施工技术的优化与创新实践，既是提升风电项目建设效率的关键，也是保障风电产业高质量发展的必然要求。本文从理论层面系统梳理技术优化路径，为行业提供可参考的改进方向。

2. 施工准备阶段的技术改进

2.1 场地规划的精细化适配

场地规划作为叶片安装的基础性工作，其合理性直接影响安装效率与叶片结构完整性。运输道路规划需精准匹配叶片运输车的尺寸参数及荷载要求，针对超长叶片，道路转弯半径应不小于车辆最小转弯半径的1.2倍，同时根据地形起伏调整坡度，并对软土地基进行碎石换填或混凝土硬化处理，避免运输过程中因颠簸或路面不平导致叶片内部纤维断裂。叶片堆放场地应优先选择地势平坦、排水良好的硬化区域，采用可调节式专用支架进行分层存放，根部与叶尖通过

柔性支撑装置固定，确保受力均匀，防止长期堆放引发局部应力集中导致的形变。吊装作业区需预留直径 ≥ 60 米的无障碍回转空间，提前清除周边高压线、树木等障碍物，确保吊装过程中叶片运动轨迹与周边设施净距 ≥ 5 米，为后续操作构建安全的物理环境^[1]。

2.2 设备选型与配置的科学匹配

设备选型对于叶片安装工程至关重要，必须严格依据叶片的物理参数，如长度、重量、重心分布等，以及安装环境特点，如场地空间、地形条件、气候状况等进行针对性匹配。

在吊装设备选择上，要重点校核其起重量、起升高度及工作半径等核心参数，确保设备性能足以满足叶片最大吊装需求，避免因参数不足引发安全事故。辅助设备方面，需具备适应复杂路况与精准微调的能力。比如运输车要配置防滑轮胎与液压平衡系统，保证在崎岖道路行驶稳定；液压装置应支持多向微调，便于及时纠正叶片姿态。

此外，设备配置要考虑冗余性设计。配置备用起重机，在主起重机突发故障时能及时顶替；准备应急电源，防止停电导致施工中断；储备备用吊具，应对吊具损坏等意外情况，从而有效应对突发设备故障或极端天气，保障施工连续性。

2.3 人员组织的专业化协同

施工团队的专业能力是叶片安装准备阶段质量的关键保障，容不得半点马虎。为提升团队整体素质，需针对叶片安装全流程开展系统且深入的专项培训。培训内容丰富全

面，涵盖叶片结构特性，让施工人员清楚复合材料分布、应力集中区域等关键信息，以便在操作中精准施力、避免损伤；明确吊装操作规范，包括吊带绑定位置、起吊速度控制等细节，确保吊装过程平稳安全；强化安全防护要求，开展高空作业规范讲解与应急逃生演练，提升施工人员的安全意识和应急处置能力。

同时，建立明确的岗位职责分工体系至关重要，清晰界定指挥人员、操作人员、安全监督员的职责。通过制定标准化作业流程，规范每个环节的操作步骤；借助高效沟通机制，如统一规范的手势信号、畅通的对讲系统，实现各环节紧密协同作业，有效避免因信息传递不畅或操作失误引发的质量问题或安全事故。

3. 叶片吊装技术的优化

3.1 吊装方案的动态适应性设计

吊装方案并非一成不变，而是需要根据现场实际情况进行灵活且科学的动态调整。在面对复杂地形时，如山地风电场，地形起伏大、坡度陡，传统的吊车站位与吊装角度可能无法满足安全与效率要求。此时，需运用专业的测量与分析工具，结合地形地貌特点，优化吊车站位，确保设备放置在坚实、平整且承载力足够的区域，避免因地面不平导致设备产生侧倾，进而引发安全事故。同时，合理调整吊装角度，使叶片在起吊过程中受力均匀，减少不必要的应力集中^[2]。

对于多台机组集中安装的场景，统筹规划吊装顺序至关重要。通过建立数学模型，综合考虑机组位置、吊装路径、设备移动成本等因素，制定出最优的吊装顺序。这样不仅能减少设备的重复移动与等待时间，还能提高吊装设备的利用率，从而显著提升整体施工效率。此外，方案设计还需充分考虑极端天气的应对措施。例如，在沿海或多风地区，设置临时防风锚点固定起重机，防止大风天气下起重机发生倾覆。同时，密切关注气象预报，根据天气变化灵活调整吊装窗口期，确保在安全的气象条件下实施作业，将天气因素对施工的影响降至最低。

3.2 吊装设备的精准化操作

吊装设备的操作精度直接关系到叶片的就位质量，对后续的风力发电机组运行稳定性有着深远影响。操作人员必须熟练掌握起重机的多动作协调控制技术。在起吊初期，采用低速缓升的方式，避免因起吊速度过快导致叶片剧烈摆动，从而增加施工风险。在回转过程中，保持匀速运动，减少惯

性冲击对叶片和设备造成的损害^[3]。

操作人员还需具备敏锐的观察力，通过实时观察叶片姿态，及时调整设备动作。例如，当发现叶片出现轻微倾斜时，迅速调整起重机的角度或吊具的张力，确保叶片始终保持水平或预设角度。对于大型叶片的多机协同吊装场景，各设备之间的操作节奏必须严格同步。通过先进的通信与控制系统，实现各设备之间的信息共享与动作协调，避免因受力不均导致叶片倾斜或设备过载。只有通过精准操作，才能实现叶片从地面到就位位置的全程稳定控制，确保吊装质量。

3.3 吊装过程的平衡与稳定控制

叶片在吊装过程中，极易受到风力、惯性力等外部因素的影响而产生摆动，这不仅增加了施工难度，还可能对叶片和设备造成严重损伤。因此，必须通过一系列技术手段强化平衡与稳定控制。

一方面，优化吊点位置与吊具结构是关键。通过精确计算叶片的重心位置，合理设置吊点，确保叶片起吊后重心与吊点垂直对齐，减少初始不平衡状态。同时，设计合理的吊具结构，使其能够均匀分散叶片的重力，避免局部应力过大。

另一方面，增设辅助稳定装置也是必不可少的措施。通过调整揽风绳的张力与角度，可以有效抵消侧向风力对叶片的影响，保持叶片的稳定。或者利用导向滑轮约束叶片的摆动轨迹，将摆动幅度控制在安全范围内。此外，还需实时监测叶片的摆动频率与幅度，一旦发现摆动异常，必要时暂停吊装操作，待状态稳定后再继续进行，避免因剧烈晃动导致结构损伤或连接失效，确保吊装过程的安全与顺利进行^[4]。

4. 安装过程的精准定位技术

4.1 定位基准的标准化建立

定位基准是叶片与塔架、机舱精准对接的基础，需基于各部件的安装参数科学确定。例如，塔架的安装中心线作为叶片纵向定位的基准，机舱的轮毂中心点作为横向与角度定位的基准；同时在塔架与机舱连接部位设置定位标记，为叶片的初步对齐提供直观参考。基准的建立需通过多次复测验证，确保其不受施工误差累积影响，为后续对接操作提供可靠的参照体系。

4.2 叶片与连接部件的协同对接

叶片与塔架、机舱的对接需通过多维度调整实现精准匹配。对于叶片与塔架的对接，需通过调整吊车的回转与变

幅动作，使叶片根部法兰与塔架顶部的连接法兰平面平行且间距一致；对于叶片与机舱轮毂的对接，需利用机舱的旋转功能调整轮毂角度，使叶片的叶根槽口与轮毂的凸台精确嵌入。对接过程中需采用导向装置辅助对齐，减少人工调整的盲目性，确保连接接口的几何精度符合设计要求。

4.3 定位精度的实时监测与修正

为确保定位精度达到毫米级，需借助高精度测量工具实时监测叶片的位置与姿态。例如，通过激光测距仪测量叶片与连接部件的间距差，通过倾角传感器监测叶片的倾斜角度，一旦发现偏差超出允许范围，立即通过微调吊车动作或机舱角度进行修正，直至满足设计要求后再进行紧固操作，避免因定位偏差导致的连接应力集中或密封失效。

5. 叶片连接技术的创新

5.1 连接结构的力学优化设计

连接结构需根据叶片的受力特点进行针对性设计，以提升连接的可靠性。例如，采用“法兰 + 螺栓 + 垫片”的复合连接形式，通过增加法兰厚度与螺栓数量分散局部应力；对于大尺寸叶片，可在连接部位增设加强筋或过渡段，避免因截面突变导致的应力集中。同时，连接结构需考虑维护便利性，例如设计可拆卸的螺栓组或模块化连接单元，便于后期叶片更换或检修时快速拆装，降低维护成本与时间成本^[5]。

5.2 连接材料的性能强化

连接材料的选择直接影响连接的耐久性与抗腐蚀能力。螺栓材料优先选用高强度合金钢，并通过热处理工艺提升其抗拉强度与韧性；法兰与垫片材料需与叶片基材兼容，避免电化学腐蚀；对于暴露在潮湿环境中的连接部位，需采用防腐涂层或不锈钢材质，延长连接结构的使用寿命，确保在复杂环境中长期保持性能稳定。

5.3 连接工艺的精细化控制

连接工艺的可靠性是连接质量的核心保障。螺栓连接需采用“预紧力控制 + 分次拧紧”的工艺，通过扭矩扳手或液压拉伸器精确控制预紧力，并按对角顺序分多次拧紧以避免法兰面受力不均；对于法兰密封，需采用高弹性密封胶填充间隙，并通过压紧力确保密封效果；连接完成后需进行无损检测，验证螺栓内部是否存在裂纹或缺陷，确保连接结构的整体性与安全性。

6. 施工后的检测与维护技术优化

6.1 叶片安装质量的全面检测

安装后的质量检测是确保叶片长期可靠运行的关键环节。检测内容需覆盖外观状态、连接质量及安装精度三方面：外观检测主要检查叶片表面是否存在运输或吊装导致的划痕、裂缝；连接状态检测需验证螺栓的紧固程度、法兰面的贴合度及密封件的完整性；安装精度检测则通过测量叶片的角度、位置及高度，确保符合设计要求，避免因安装偏差影响机组捕风效率或产生额外应力。

6.2 维护技术的针对性升级

叶片在运行过程中需定期维护以延长使用寿命。日常维护包括清洁叶片表面、检查连接螺栓的紧固状态、修补表面涂层；对于长期运行的叶片，需重点关注复合材料的老化，采用红外热成像或超声波检测技术识别内部损伤，并通过局部修复恢复结构完整性。维护技术需根据叶片运行环境与使用年限动态调整，确保防护措施的有效性。

6.3 检测与维护周期的动态优化

检测与维护周期需基于叶片的实际运行状态灵活调整。新安装叶片在投运初期需缩短检测周期，重点监测安装质量的稳定性；后期可根据历史数据逐步延长周期，但对于高风速区域或沿海盐雾环境的叶片，需保持高频次检测。此外，可引入数字化监测系统，实时采集运行数据并预测潜在故障，实现从“定期维护”向“状态维护”的转变，提升维护效率与经济性。

7. 结论

陆上风电叶片安装施工技术的优化与创新是一个系统性工程，贯穿施工准备、吊装操作、精准定位、连接技术及检测维护全流程。通过施工准备的精细化适配、吊装技术的动态优化、精准定位的科学实施、连接技术的创新升级以及检测维护的动态管理，可显著提升叶片安装施工的可靠性、安全性和经济性。未来，随着风电机组容量进一步增大与智能化技术的深度融合，叶片安装施工技术将向更高精度、更低成本、更可持续的方向发展，为陆上风电的大规模应用提供更坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 陈月 . 风电领域高效风力发电机叶片结构优化设计与动态性能分析 [J]. 机电工程技术 ,2025,54(08):182–185.
- [2] 王慧 . 风电叶片根部螺栓预埋安装技术 [J]. 设备管理与维修 ,2022,(18):133–135.
- [3] 谢少军 . 风力机叶片铺层结构的强度特性研究及设

计优化 [D]. 浙江工业大学 ,2012.

[4] 梁朋 , 吴瑞鹏 , 高耀岗 , 等 . 风电机叶片复合材料涂层必要性浅析 [J]. 科技资讯 ,2013,(23):112.

[5] 胡俊 . 风电叶片玻璃纤维布自动铺层控制技术研究

[D]. 山东理工大学 ,2019.

作者简介: 杨小胜 出生年月日 :1978.10.21 性别 : 男
民族 : 汉 籍贯 : 贵州省清镇市 学历 : 大专 职称 : 初级 从
事的研究方向 : 新能源项目建设管理