

基于安全性和效率的山地风电场单叶片 吊装方案比较分析

白斌

榆林国远风电有限公司，陕西 榆林 719000

摘 要： 随着风电行业发展，项目用地面积受限，机组单机容量的增大，叶片的长度、重量的增加，造成叶片的运输成本增加和叶轮整体吊装风险大，同时对主吊车、吊装平台、地基承载力也提出了更高的要求。因此，对吊装方案进行比较分析，提出更加经济合理、安全可靠、安全高效的吊装方案显得尤为重要。本文首先探讨了山地风电场单叶片吊装方案的特点；其次分析了基于安全性和效率比较山地风电场单叶片吊装方案的必要性和现存问题；最后提出了优化山地风电场单叶片吊装方案的策略，包括建立完善的数据收集体系、统一安全评估标准等。

关 键 词： 山地风电场；单叶片吊装；安全性；效率

Comparative Analysis Of Single Blade Lifting Scheme Of Mountain Wind Farm Based On Safety And Efficiency

Bai Bin

Yulin Guoyuan Wind Power Co., LTD., Shaanxi, Yulin 719000

Abstract： With the development of wind power industry, the project land area is limited, the increase of the unit capacity, the length and weight of the blade, resulting in the increase of the transportation cost of the blade and the overall lifting risk of the impeller, at the same time, the main crane, lifting platform, foundation bearing capacity also put forward higher requirements. Therefore, it is particularly important to compare and analyze the lifting scheme and put forward a more economical, reasonable, safe, reliable, safe and efficient lifting scheme. This paper first discusses the characteristics of the single blade lifting scheme of mountain wind farm, then analyzes the necessity and existing problems of comparing the single blade lifting scheme of mountain wind farm based on safety and efficiency; and finally proposes the strategy of optimizing the single blade lifting scheme of mountain wind farm, including establishing perfect data collection system and unified safety assessment standard.

Keywords： mountain wind farm; single blade hoisting; safety; efficiency

引言

叶片吊装是风电场建设过程中的重要环节，在满足叶片安全运行和施工进度的前提下，合理选择叶片吊装方案对于提升风电场建设效益具有重要意义。基于对叶片吊装方案的对比分析，在满足叶片安全运行的前提下，在塔筒高度相同的情况下，选择单叶片吊装方案能有效节约土地利用，能最大程度减少实时风速对风机吊装影响，减少项目投资成本；受制于山地地形地势、用地红线，当塔筒高度相同时，单叶片吊装方案能有效缩短施工工期，节约土地、工期成本。

一、山地风电场单叶片吊装方案的特点

（一）复杂性

山地风电场的地形起伏大、地势陡峭，增加了施工的难度和风险。交通条件受限，大型设备运输困难，现场作业空间狭小，给吊装设备的布置和操作带来极大挑战。气候条件多变，如强风、暴雨等恶劣天气频繁，影响施工进度和安全性。此外，复杂

的地质条件也可能导致基础不稳定，增加吊装过程中的不确定性。例如，在某山地风电场建设中，因道路崎岖，运输叶片的车辆无法直接到达机位，需额外修建临时道路及进行空障清理，施工难度大，耗费了大量时间和成本。

（二）高风险性

首先，复杂的地形增加了运输和起吊设备就位的难度，叶片大、重心高，对运输举升车、操作人员技术水平要求高，设备拖

作者简介：白斌，男，汉族，出生年月：1989年11月，陕西省榆林市神木市，大学本科，助理工程师，研究方向：新能源风电、光伏建设运营。

拽、大件运输、叶片吊装都为高风险作业，稍有不慎就可能导致设备倾倒或滑落。例如，陡峭的山坡地基承载力达不到要求，可能导致起重机失去平衡。其次，多变的气象条件，如强风、暴雨等，也会影响吊装的稳定性和安全性。比如，突然的强风可能使叶片在空中失控摆动。最后，山地施工空间有限，增加了各环节操作的难度和碰撞风险。总之，山地风电场单叶片吊装面临着众多潜在风险，需要精心规划和严格把控。

（三）环境适应性

在山地风电场中，风场内风速偏大，风机叶片通常处于风口位置，承受着强劲风力。若采用常规吊装方式进行叶片吊装作业，山地平台小叶轮组装困难，叶轮开始组装到吊装完成耗时长，无可靠合适锚点能固定叶轮，辅吊站位受限，极有可能因大风导致叶片在吊装平台无法固定旋转造成设备损坏，在整叶轮吊装过程中，因突然阵风导致叶轮与吊车磕碰，甚至发生吊车折臂与叶轮整体倾覆，对工程质量造成严重影响。故而，要达成山地风电场中叶片安全、高效的安装，需对单叶片吊装方案加以改进与完善，令其适应各类环境下的安装需求。

（四）技术要求高

山地风电场因其地形条件繁杂，常规的叶轮整体安装方式受限。为提升施工效率，往往会运用单叶片吊装技术来进行叶片安装。然而，相较常规吊装方式，单叶片吊装技术在吊装设备、吊装方法以及吊装过程中的安全保障方面有着更高标准。例如，传统整叶轮吊装工况由叶轮总重+静载+动载决定主吊选型，同步复核机舱吊装工况；单叶片吊装则由吊装机舱总重+静载+动载决定主吊选型，复核单叶片吊装载荷。所以，单叶片吊装技术对主吊选型要求相对较低，经过大量实践研究，单叶片吊装对山地用地面积受限风电项目应用成效显著。

二、基于安全性和效率比较山地风电场单叶片吊装方案的必要性

（一）保障人员生命安全

在山地风电场的叶片吊装中，对人员安全的要求是最高的。因此，必须采取严格的措施来保障人员的生命安全。如果采用传统整叶轮吊装方案，整个叶轮同时吊装，若遇极端天气，叶轮难以平稳着陆或完成吊装，存在巨大危险，极易引发人员、设备、机械等安全事故。而单叶片吊装方案每次只有一个叶片起落，能够最大限度规避此类危险。此外，在开展吊装作业时，因需运用大型机械设备，传统整叶轮吊装的现场通常较为拥挤，山地吊装平台半填半挖，边坡的稳定性差，溜尾吊车临近边坡，极易出现侧翻等意外状况。然而，单叶片吊装方案无需设立多个平台和通道，大大降低了现场的安全风险。所以，从保障人员生命安全的层面考虑，单叶片吊装方案无疑是更优选择^[1]。

（二）减少设备损坏风险

在山地风电场的单叶片吊装过程中，减少设备损坏风险至关重要。由于山地地形复杂，气候多变，吊装操作面临诸多挑战。比如，强风可能导致叶片在空中摆动幅度过大，碰撞到塔筒或其

他物体。若吊装方案不合理，可能引起吊具故障，对叶片造成挤压或刮擦。例如，某山地风电场在吊装时，因未充分考虑地形影响，选择的起吊角度不当，致使叶片与周边岩石发生碰撞，造成严重损坏，不仅延误了工期，还增加了巨大的维修成本。因此，对不同的吊装方案基于安全性和效率进行比较，能有效减少此类设备损坏风险。

（三）提高项目施工进度

对于山地风电场来说，由于地形复杂、地貌多变等特点，导致建设项目受天气影响较大，尤其是当遇到恶劣天气时，不利于施工组织和施工进度。若采取传统吊装方法，需对整个机组进行分块拆卸，再重新组拼后才能完成安装，这种方式不仅费时费力，而且增加了额外成本。而单叶片吊装模式则可以有效缩短工期，降低成本投入。此外，在某些情况下，通过采用单叶片吊装模式还可实现叶片的就地存放，避免了长距离运输带来的风险和成本，这在一定程度上也提高了项目施工的效率和质量。因此，从施工进度角度出发，选择单叶片吊装方案是十分必要的。

（四）降低项目成本

对于风电机组的吊装，吊装费用一般占到总投资成本的 30% 以上。随着近年来风电行业的快速发展，我国对风电机组的吊装提出了更高的要求。对于山地风电场而言，其地形复杂多变，使得采用整叶轮吊装方式的难度大大增加。在实际工程中，若采用整叶轮吊装方式，需要根据每台机位的具体情况和气候环境等因素来设计吊装方案，因此也会导致整叶片的运输、组装和安装成本大大增加。而采用单叶片吊装方案，可以有效地降低吊装成本，减少因运输、组装和安装产生的额外成本^[2]。

三、山地风电场单叶片吊装方案存在的问题

（一）数据收集困难

叶片的吊装位置受风力影响较大，当风速超过某一数值时，会对叶片吊装产生严重影响。在山地风电场中，由于地形、地貌等因素的限制，使得测风塔难以覆盖风电场区域，再加上叶片安装需要较长时间，无法准确获得数据，因此不能及时进行数据收集工作。同时，现场无法测量的风向也给数集工作带来了很大困难，因此在单叶片吊装方案中，还需针对不同风向来调整方案^[3]。

（二）吊装范围有限

山地风电场的地形复杂多样，这导致单叶片吊装的范围受到很大限制。由于山体的起伏和坡度变化，部分区域可能难以到达，限制了吊车的作业位置选择。比如在陡峭的山坡处，吊车无法靠近塔筒，增加了起吊的难度和风险。另外，有限的吊装范围还可能影响叶片的运输路径。某些狭窄的山道无法容纳大型运输车辆通行，导致叶片运输受阻。例如某山地风电场，因道路狭窄，叶片在运输过程中不得不多次调整角度和路线，延误了吊装时间，降低了效率^[4]。

（三）效率计算方法差异

在山地风电场单叶片吊装方案中，效率计算方法存在明显差异，这给方案的评估和选择带来了困扰。不同的计算方法可能侧

重不同的因素，如有的仅考虑吊装时间，忽略了前期准备和后期调试的时长；有的则未充分考虑山地特殊环境对施工的影响。例如，一种方法可能将设备运输到施工现场的时间排除在外，而在山地，复杂的路况会大大增加运输时间。另一种方法可能未将因天气变化导致的停工时间纳入计算。这种差异使得对吊装方案效率的评估缺乏统一标准，影响了方案的优化和决策^[5]。

（四）环境因素考虑不全面

对于单叶片吊装方案而言，其在运行过程中会受到风力、风速、温度等诸多环境因素的影响。而目前大部分风电场没有对这些环境进行全面分析和考虑，进而导致了单叶片吊装方案设计存在一定的安全隐患。例如：在西北地区的山地风电场，由于大部分风力都比较强劲，因此需要采取措施保证叶片能够顺利吊装至轮毂中心；但如果不注意对环境进行全面分析，就可能会忽视某些因素，最终导致叶片吊装失败。此外，在某些特殊环境下，还需使用专用设备或工具才能完成叶片吊装作业。如果对这些因素不加以重视，就会造成不必要损失^[6]。

四、基于安全性和效率优化山地风电场单叶片吊装方案的策略

（一）建立完善的数据收集体系

为了获得足够多的数据，在设计方案前需要对山地风电场的详细资料进行收集，主要包括风场基本信息、风机基础地理坐标、风机叶片类型和重量等。其中，风机叶片重量是计算单叶片吊装成本的重要参数。根据已有经验数据，合理确定叶片的安装高度和吊装半径，进而得到最大的单台风机组吊装成本^[7]。

（二）统一安全评估标准

为使山地风电场叶片吊装安全风险评估标准化、规范化，建议行业统一吊装安全评估标准，具体内容包括：①根据现场实际环境、叶片形状尺寸等，明确设计载荷；②规定从风、雨、雪、雷等极端天气出发的应急预案和紧急避险措施；③设置与之相匹配的技术标准和操作规范；④制定针对特定机型的吊装工艺要求^[8]。

（三）全面考虑环境因素影响

在优化山地风电场单叶片吊装方案时，全面考虑环境因素的影响极为关键。山地的复杂环境，如多变的风向、风速，崎岖的地形以及不稳定的地质条件等，都会给吊装带来诸多挑战。例如，强风可能导致吊装过程中叶片失去平衡，增加安全风险；崎岖地形可能限制吊车的站位和操作空间，影响吊装效率。若在方案制定中忽视这些因素，可能引发事故。因此，在制定方案前，要详细勘察现场环境，收集准确的气象和地质数据，以便根据环境特点调整吊装的时间、角度和设备选型等，确保吊装的安全性和效率^[9]。

（四）及时更新技术与方案

风电机组叶片作为山地风电场中最主要的设备，其安装技术需要随着技术水平的提高而不断更新。一方面，风电公司应结合自身生产条件、设备情况等制定切实可行的单叶片吊装工作方案；另一方面，相关企业也要与科研机构密切合作，共同研发适用于我国山地风电场的新型叶片吊装技术，从而提高山地风电场吊装作业的安全性和效率。同时，单叶片吊具优点在于灵活、对场地要求低、受风速影响相对较小，缺点是高空安装时间较长。总之，在新时代背景下，为进一步提高我国山地风电场吊装作业的安全性与效率，相关单位必须综合考虑各项影响因素，采取有效措施进行优化^[10]。

结语

综上所述，山地风电场单叶片吊装方案具有复杂性、高风险性等特点，对其基于安全性和效率进行比较、优化十分必要。我们认识到当前方案存在的诸多问题，也提出了相应的解决策略。未来，我们应持续关注行业发展，不断完善和创新。通过建立更完善的数据收集体系、统一标准等策略，提高山地风电场单叶片吊装的安全性和效率，降低成本，推动风电场的稳定运营和可持续发展。

参考文献

- [1] 范迪. 某山地风电场 EPC 总承包项目冬季单叶片吊装过程管理控制重点探讨 [J]. 机电信息, 2020, (21): 136-137.
- [2] 孙二涛. 山地风电场风机单叶片吊装技术 [J]. 建材与装饰, 2020, (19): 245+247.
- [3] 罗晨阳, 冯士伦, 唐友刚, 等. 海上大型风机单叶片吊装风载荷计算程序开发 [J]. 海洋技术学报, 2024, 43(03): 91-100.
- [4] 杨威. 风电机组单叶片吊装探析 [J]. 中国设备工程, 2023, (S1): 135-138.
- [5] 郭旺, 强喜臣, 王琦, 等. 一种风电机组单叶片吊装电动盘车装置试验研究 [J]. 东方电气评论, 2022, 36(04): 74-76.
- [6] 徐权, 陈如玉. 某山地风电场建设前后发电量损失研究 [J]. 东北电力技术, 2023, 44(11): 52-55+62.
- [7] 陈湘蓉. 山地风电场道路工程设计问题研究 [J]. 科技资讯, 2023, 21(22): 164-167.
- [8] 李金级, 敖娟, 孔婕, 等. 基于 CFD 的复杂山地风电场机组振动风险识别研究 [J]. 风能, 2023, (10): 60-67.
- [9] 曹朔, 王媛媛, 权雪祺, 等. 山地风电场维检任务智能调度 [J]. 电工技术, 2023, (14): 77-80.
- [10] 罗方颢, 王莹. 某山地风电工程项目后评价 [J]. 电工技术, 2023, (12): 68-71.