

风机叶片高空安装过程中的风场干扰应对与吊装路径规划

祁海亮

中国能源建设集团湖南火电建设有限公司 湖南长沙 410015

摘要：风机叶片高空安装过程中，风场干扰是影响施工安全与效率的关键因素，而科学的吊装路径规划是应对此类干扰的重要手段。本文结合现有研究成果，深入分析自然风场对叶片安装的具体影响，探讨不同吊装方案的适用场景与优化路径，提出动态平衡、风速预警等针对性应对措施，旨在为风机叶片高空安装提供兼具学术价值与实践指导意义的解决方案，助力提升风电工程施工的安全性与效率。

关键词：风机叶片；高空安装；风场干扰；吊装路径

引言

随着风电产业向大容量、大型化发展，风机叶片尺寸不断增大，高空安装环境愈发复杂。在安装过程中，高空风场具有强随机性与不稳定性，易导致叶片姿态失衡、对接偏差，甚至引发安全事故。同时，吊装路径的合理性直接影响施工效率与设备损耗。因此，深入研究风场干扰的应对策略与吊装路径规划方法，对推动风电工程高质量建设具有重要现实意义。

一、风场干扰类型及影响分析

（一）自然风场干扰

自然风场干扰是风机叶片高空安装面临的主要挑战，其影响贯穿安装全过程。风速的大小与方向变化直接改变叶片所受气动力载荷^[1]。以NERL 5MW标准风机叶片为例，其升力与阻力均与风速平方成比例，当俯仰角为20°左右时，总升力达到最大值。而俯仰角小于10°时，升力呈现负值，叶片受向下的合力作用。高风速下，叶片单位长度升力与阻力在距叶根10m左右区域最为显著，叶尖处虽升力系数较大，但单位长度受力较小，这种分布差异易导致叶片产生扭曲力矩。

风向的改变通过影响叶片攻角作用于安装过程，攻角是叶片弦线与风向的夹角，与空气动力扭角共同决定叶片受力状态。当攻角在10°左右时，升力系数达到峰值，且翼型相对厚度为40%时升力系数最大。阻力系数同样在该相对厚度下表现出最大值。俯仰角变化也会加剧风场干扰，当俯仰角超过40°，升力系数随角度增大而减小80°左右时，距叶根10m区域阻力系数最大，高俯

仰角下总阻力急剧增加，对叶片姿态控制构成极大挑战。

风场的湍流特性进一步增加安装难度，湍流导致风速在短时间内剧烈波动，使叶片承受瞬时冲击载荷，破坏准静态平衡。叶片在吊装过程中，若吊索位置偏离重心，会产生附加力矩，在风载荷与吊索力矩的共同作用下，缆风绳需承受更大拉力以维持平衡。当吊索作用力臂偏离重心时，相同风速下缆风绳拉力显著增大，一旦超过其承载极限，将引发断裂风险，威胁施工安全。

（二）电磁干扰

在风机叶片高空安装场景中，电磁干扰虽非主导因素，但仍需关注。风电场周边多存在输电线路、通信设备等，其产生的电磁辐射可能对吊装设备的电子控制系统造成干扰。例如，起重机的液压控制系统、缆风绳的张力传感器若受电磁干扰，可能出现信号失真，导致操作指令延迟或误动作，间接影响叶片吊装精度与稳定性。此类干扰的影响程度与设备抗干扰能力、电磁源强度及距离相关。相较于自然风场干扰，电磁干扰具有一定可控性，可通过设备屏蔽、信号滤波等技术手段降低其影响，因此在工程实践中常作为次要因素进行防控。

二、吊装路径规划策略

（一）吊装方案选择

吊装方案的确定需通盘考量施工环境的地形特征、现有设备的性能参数以及叶片的结构特性。单叶片高空组合安装技术在地形复杂、吊装平台空间受限的场景中展现出显著适应性，山地风电场或海上狭窄作业区域均可采用。该技术的核心在于专用吊具的应用，其俯仰机构可调节叶片绕水平横轴的转动角度，旋转机构可实现叶片在水平、垂直及120°三种姿态间的转换，抱合及夹持机构则通过贴合叶片表面的夹持板提供稳定夹持力，既能防止叶片滑脱，又能保护叶面不受损伤。广东清远

作者简介：祁海亮（1996—），男，汉族，甘肃渭源人，学士学位，初级职称，研究方向：新能源科学与工程。

某风电场应用该技术时，借助专用吊具的高空自动脱钩功能减少摘钩风险，同时因无需大面积地面组装区域，吊装平台面积大幅缩减，且将吊装安全临界风速提升至12m/s，有效延长了施工可作业时段。

三叶式整体吊装方案更适用于配备大型起重设备且作业空间开阔的场景，新型三叶式安装工艺将叶轮组装环节从陆地转移至自升式风电安装平台，叶片与轮毂通过运输驳船散运至风场机位点，再倒驳至平台进行整体组装。此工艺省去了陆地码头的整体组装环节，降低了对运输船型宽和承重的要求，进而减少二次吊装风险。以明阳智能MySE7.0机型安装为例，施工前通过三维模拟预演叶轮吊装全过程，精准测算各阶段受力极限，主吊机与辅吊机协同作业，借助轮毂特制吊耳与叶尖辅助吊带实现叶轮平稳翻身，确保对接精度符合设计标准，显著提升了整体施工效率。

单叶片与三叶式方案各有侧重，单叶片方案对起重设备规格要求较低，能适应复杂地形，但需三次高空对接作业，对姿态控制精度要求更高。三叶式方案虽整体吊装效率突出，但依赖大型起重设备和开阔作业空间，且叶轮组装阶段需严格把控平衡度，避免因单叶组导致整体倾翻。工程实践中，需依据风场地形特征、设备资源配置及工期要求灵活选用，必要时可采用混合模式，在地形复杂区域实施单叶片安装，在开阔区域采用三叶式整体吊装，以实现效率与适应性的平衡^[2]。

（二）路径优化模型

吊装路径优化需建立在叶片受力特性与风场动态数据的基础上，构建精准的数学模型。以准静态平衡方程为核心，将叶片与夹具视为刚性整体，按六自由度刚体进行力学分析，综合考量重力、风载荷、吊索拉力及缆风绳控制力的作用。通过解算带约束的线性方程组，可确定叶片在特定姿态下保持平衡所需的最小缆风绳拉力。模型中，吊索作用点的选择至关重要，当吊索作用点与叶片重心重合时，可避免附加力矩产生，显著降低缆风绳负荷，因此路径规划需优先保证吊索沿重心垂线运动，减少不必要的力矩平衡需求。

风场动态数据的引入使路径模型具备实时调整能力，风速与风向的变化通过欧拉角旋转矩阵转换至叶片坐标系，实时更新叶片各截面所受升力、阻力及俯仰矩。NERL 5MW叶片在不同俯仰角下受力差异显著，其俯仰角20°左右时总升力最大，超过40°后升力系数随角度增大而减小，这些数据可作为模型输入，动态调整吊装速度与方向。当监测到风速突增时，模型能快速计算叶片受力平衡点，确定最优暂停位置，待风场稳定后再继

续作业，确保叶片始终处于受力平衡状态。

路径规划还需兼顾障碍物规避与设备性能限制，通过三维建模技术还原吊装空间，精确标注塔筒、吊臂等障碍物位置，确保叶片运动轨迹与障碍物保持安全距离。同时，将起重机最大起重量、吊索破断拉力、缆风绳最大张力等参数作为路径边界条件，在模型中设置约束，避免设备超载运行^[3]。例如，单叶片吊装时，叶尖通过防护套连接缆风绳，路径规划需计算缆风绳的最大允许摆动幅度，防止叶片与吊臂或塔筒发生碰撞。

（三）风险评估与应急预案

风险评估需贯穿吊装全过程，精准识别风场突变、设备故障、操作偏差等潜在风险。风场突变是最主要的风险源，需依据历史气象数据与实时监测结果划定作业权限：单叶片吊装时，风速超过12m/s需立即停止作业。三叶式整体吊装因叶轮受风面积更大，需根据实际测算调整临界风速值。设备故障方面，需重点关注专用吊具焊缝完整性、液压系统压力稳定性及缆风绳张力传感器精度，定期进行无损探伤与1.25倍静载试验，确保吊具无变形、开裂等缺陷。

应急预案需分级制定，针对性处置不同风险场景。一级预案针对轻微风场波动，通过微调缆风绳拉力与吊索位置维持叶片姿态平衡，例如当风速在8-10m/s区间波动时，利用专用吊具的俯仰机构微调叶片角度，减少风载荷冲击。二级预案适用于风速骤升或设备异响情况，立即暂停吊装作业，将叶片固定在安全姿态——单叶片可通过抱合机构锁紧并启用备用缆风绳加固，三叶式整体叶轮则需主辅吊机协同将其稳定悬停，同时撤离作业人员。三级预案对应极端天气或重大故障，启动紧急制动系统，单叶片吊装需将叶片缓慢下放至临时支撑装置，三叶式则需将叶轮降至平台稳固位置，防止因失控导致设备损坏。

定期应急演练是确保预案落地的关键，演练内容需涵盖风场突变时的姿态调整、缆风绳断裂后的应急加固、吊具液压系统故障的手动操作等场景。演练中需检验操作人员对专用吊具旋转、俯仰机构的协同控制能力，以及对风速预警信号的响应速度，确保在实际风险发生时，团队能快速联动，缩短应急处置时间，降低事故损失。

三、风场干扰应对措施

（一）动态平衡系统

动态平衡系统通过实时调节吊索与缆风绳的受力状态，抵消风场干扰对叶片姿态的影响。该系统以叶片准静态平衡方程为算法核心，整合姿态角传感器、风速仪及张力传感器采集的数据，经PID控制器运算后输出调整指令，驱动液压执行机构改变缆风绳张力与吊索位置

^[4]。例如，当风载荷导致叶片产生俯仰力矩时，系统可通过增大一侧缆风绳拉力、减小另一侧拉力的方式平衡力矩，同时微调吊索位置以减少附加力矩产生。

无迹卡尔曼滤波与PID结合的主动闭环控制系统在动态平衡中表现突出，该系统通过无迹卡尔曼滤波算法优化传感器数据处理精度，降低噪声干扰，使缆风绳主动控制力的变化率显著降低，从而减少对硬件设备响应速度的要求。在110m高空吊装模拟中，该系统能将叶片姿态偏差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内，尤其适用于NERL 5MW等大型叶片的对接作业——通过优化俯仰角与缆风绳拉力的匹配关系，确保叶片在不同风速下均能维持稳定姿态。

尾部配重调节是动态平衡的重要补充手段，专用吊具配置固定或可移动配重块，通过改变整体重心位置配合吊索调整，增强叶片抗风稳定性。广东清远某风电场的实践表明，合理调整配重位置后，叶片在8-10m/s风速下的摆动幅度明显减小，为高空对接创造了稳定的姿态条件。配重调节需与吊具夹持位置协同考量，确保整体重心与吊点的相对位置处于最优状态，进一步提升抗风干扰能力。

（二）风速预警系统

风速预警系统由监测终端、数据传输网络与预警平台构成，实现风场数据的实时采集、分析与预警联动^[5]。监测终端采用激光测风雷达与超声波风速仪组合模式，激光雷达用于获取高空风速数据，超声波风速仪则监测近地面风场变化，采样频率不低于1Hz，确保捕捉瞬时风速波动。数据经传输网络实时发送至预警平台，平台通过分析历史同期气象数据与实时监测值，构建风速趋势预测模型，提前10-30分钟预判风速变化，为施工决策提供依据。

分级预警机制的建立使风险管控更具针对性，当风速处于8-10m/s区间时，启动蓝色预警，加强叶片姿态监测与微调，必要时增加缆风绳张力储备。风速升至10-12m/s时，触发黄色预警，停止叶片起升或对接作业，将其固定在安全姿态。风速达到12m/s及以上时，红色预警启动，所有吊装作业立即终止，人员撤离至安全区域。如东400MW海上风电场应用该系统后，通过精准预警与及时响应，有效减少了因风场突变导致的停工次数，显著延长了施工可作业时间。

（三）电磁干扰防控措施

电磁干扰防控需从设备选型与布线设计两方面着手，控制设备优先选用具备电磁兼容认证的型号，液压电磁阀采用带屏蔽层的设计，张力传感器选用抗干扰能力强的类型，减少外部电磁信号对设备的影响。电路设计中

增加滤波器与浪涌保护器，滤波器用于抑制高频电磁干扰，浪涌保护器则可吸收瞬时电压冲击，保障控制系统电路稳定。

布线规划需避免电磁耦合干扰，动力电缆与控制电缆分开敷设，间距保持在0.5m以上，减少电缆间的电磁感应。通信线路采用光纤传输，利用光纤抗电磁干扰的特性，从根本上解决信号传输过程中的干扰问题。吊装控制柜内设置接地铜排，所有设备外壳均与铜排连接后接入接地网，接地电阻严格控制在 4Ω 以下，确保静电与干扰电荷能快速释放。

定期开展电磁环境监测同样重要，使用频谱分析仪对吊装区域的电磁强度进行检测，若发现异常干扰源，立即采取隔离措施，如增加屏蔽挡板或调整设备摆放位置。通过上述综合措施，可显著降低电磁干扰导致的设备故障率，保障吊装过程中设备指令的精准执行^[6]。

结论

风机叶片高空安装中的风场干扰应对与吊装路径规划是一项系统性工程，需结合力学分析、控制技术与工程实践综合施策。自然风场通过风速、风向与湍流特性影响叶片受力，电磁干扰虽影响较小但仍需防控。吊装方案的选择应因地制宜，单叶片方案适应复杂地形，三叶式方案效率更高，路径优化需基于动态平衡模型与风场数据实时调整。动态平衡系统、风速预警系统与电磁干扰防控措施共同构成了风场干扰的应对体系，可有效提升安装安全性与效率。

参考文献

- [1]张英, 刘宾.基于深度学习的风机叶片边缘检测[J].国外电子测量技术, 2023, 42(7): 140-145.
- [2]蔡舒鹏, 张永康, 金晔, 梁岩峰, 姜季江, 薛驰, 林峰.大型海上风机单叶片高空对接过程的力学分析[J].机电工程技术, 2022, 51(10): 17-2125.
- [3]李力强.风机叶片高空组合安装技术[J].电力勘测设计, 2022(6): 83-86.
- [4]李力强, 曹磊.风机叶片高空组合施工技术[J].山西电力, 2022(6): 26-28.
- [5]王弟方, 龚波涛, 熊圣新, 李晓艳, 倪远翔.一种风机单叶片吊装盘车装置的研究[J].船舶工程, 2020, 42(S02): 277-281.
- [6]张俊蕾, 吴献国, 周锋.一种新型三叶式风机安装工艺[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2022(8): 100-102.