

风电发电机吊装作业中的起重臂负载分析

高维东

中国三峡新能源（集团）股份有限公司建设管理分公司西部建设管理部 陕西延安 716000

摘要：随着风电产业快速发展，大型化、高塔架风电发电机组的吊装作业对起重设备的安全性和效率提出了更高要求。起重臂作为吊装作业的核心部件，其负载特性直接影响作业的安全性与经济性。本文系统分析了风电发电机吊装作业中起重臂负载的主要影响因素，包括静态负载、动态负载及环境干扰等，探讨了理论计算模型、数值模拟技术及现场实测验证等核心分析方法，并提出了吊装方案设计、安全措施强化及人员培训等负载优化策略，旨在为风电吊装作业提供科学依据与技术支撑。

关键词：风电发电机；吊装作业；起重臂负载；数值模拟；安全优化

引言

风电发电机吊装作业是风电场建设的关键环节，涉及超重、超高、复杂工况下的多设备协同作业。起重臂作为吊装系统的核心承载部件，其负载状态直接决定作业的安全性与效率。然而，风电发电机体积庞大、重心分布复杂，且受风场环境动态影响显著，导致起重臂负载呈现高度非线性特征。因此，深入分析起重臂负载特性并优化作业方案，对保障吊装安全、降低事故风险具有重要意义。

一、风电发电机吊装作业概述

风电发电机吊装作业是风电场建设中的核心环节，涉及超重型部件的高空精准组装，其复杂性与风险性远超常规工程作业。单机容量5MW以上的大型风电机组，其机舱重量普遍超过120吨，叶片长度突破90米，而塔筒高度则常达150米以上，这些巨型部件的吊装需借助千吨级履带吊或全地面起重机完成。作业流程涵盖塔筒逐节拼接、机舱精准就位、叶片高空组装及电气系统对接等关键步骤，每一步均需严格遵循预设方案执行。在吊装过程中，起重臂需承受设备自重产生的静态压力，同时应对风场动态变化引发的侧向载荷，例如瞬时风速突变可能导致叶片产生数吨级的摆动力，而吊装路径中的微小偏差也可能引发设备碰撞风险。由于风电场多位于沿海、山地等复杂地形区域，吊装作业还需克服地形起伏、空间狭窄等物理限制，例如山区作业时需通过地形建模优化起重机站位，避免因坡度过大导致设备倾覆。此外，吊装窗口的选择高度依赖气象条件，需精确

计算风速、风向、温度等参数，确保在有限时间内完成高风险操作。整个作业过程需多工种协同配合，从地面指挥到高空作业，从机械操作到安全监控，任何环节的疏漏均可能引发连锁反应，因此吊装作业的安全性与效率直接决定了风电项目的建设周期与经济效益。

二、起重臂负载的主要影响因素

1. 静态负载

静态负载作为风电发电机吊装作业时起重臂所受的基本负载，其主要决定于设备自重和分布特性。飞机的机舱和叶片等关键部件的重量会通过吊具直接传至起重臂，从而产生垂直方向的集中力。例如，一个单机容量为8MW的风电机组，其机舱重量可以高达150吨，这种静态压力对起重臂的结构稳定性有着显著的影响。另外，设备重心位置对于负载分布起到关键性作用，如果机舱或者叶片重心偏离起重臂轴线会引起附加弯矩，从而使起重臂根部应力明显增加，特别是在全伸臂的工作条件下，该偏心效应会导致局部应力超过材料的屈服极限。配重设计也不容忽视，当起重机主起重量不足或者辅助起重量分配不合理都会诱发整机前倾或者侧翻的危险，超起装置配置需要准确搭配吊装幅度和负载重量才能保持起重机抗倾覆稳定性。准确计算静态负载需要将设备三维模型和起重臂结构参数相结合，并对其进行有限元分析，模拟出各种工况应力分布情况，从而对吊装方案的制定提供数据支持。

2. 动态负载

动态负载是风电发电机吊装作业中起重臂承受的关键挑战，源于吊装过程中的运动状态变化与环境干扰的

叠加效应。起升、变幅及回转动作产生的加速度会引发惯性力，例如紧急制动时设备摆动形成的冲击载荷，可能瞬间超出静态负载的20%以上，导致起重臂结构振动加剧。风场环境的动态特性进一步复杂化负载分布，瞬时风速突变或阵风作用会使叶片产生周期性摆动，其侧向力通过吊具传递至起重臂，引发附加弯矩与扭矩，尤其在叶片高空组装阶段，风载效应可能使起重臂末端位移量增加数倍。此外，设备吊装路径中的非线性运动，如多机协同抬吊时的运动不同步，会产生复杂的动态交互载荷，而地形起伏或起重机支腿沉降则可能引发负载重心偏移。动态负载的精确评估需结合实时风速监测、运动轨迹仿真及振动频谱分析，通过多物理场耦合模型预测关键节点的应力响应，为安全控制提供决策依据。

3. 其他因素

其他因素对风电发电机吊装作业中起重臂负载的影响不容忽视，这些因素往往以隐性方式加剧作业风险。环境干扰是重要变量，例如复杂地形中的坡度变化可能导致起重机支腿受力不均，而昼夜温差引发的钢结构热胀冷缩会改变起重臂的刚度特性，进而影响负载传递路径。设备长期服役带来的结构疲劳与腐蚀问题同样关键，焊缝裂纹或金属疲劳会降低起重臂的承载能力，尤其在高频次吊装作业中，累积损伤可能引发突发性失效。人为操作因素也不可小觑，吊装路径规划不合理或操作指令延迟会导致设备摆动幅度增大，而多机协同作业时信号同步误差可能引发动态载荷突变。此外，电磁干扰可能影响传感器精度，导致负载监测数据失真，而吊装区域内的障碍物或地面沉降则可能改变负载分布边界条件。这些因素虽难以量化，但需通过风险评估矩阵与冗余设计策略进行预防性控制，确保吊装作业的安全裕度。

三、起重臂负载分析的核心方法

1. 理论计算模型

理论计算模型是解析风电发电机吊装作业中起重臂负载特性的核心工具，其构建需深度融合力学原理与工程经验，以精准映射复杂工况下的应力分布与变形规律。基于经典梁理论或板壳理论，模型将起重臂简化为变截面弹性体，通过微分方程描述其在自重、风载及惯性力作用下的力学响应，但此类线性模型难以捕捉局部应力集中与几何非线性效应。为此，需引入有限元方法（FEM）进行离散化处理，将起重臂划分为数万至数十万个单元，结合材料本构关系与边界条件，构建大规模刚

度矩阵以求解非线性方程组，这一过程需平衡计算精度与效率，例如采用子结构法或模型降阶技术加速收敛。动态负载的模拟则依赖多体动力学理论，将设备运动与起重臂弹性振动耦合求解，考虑接触碰撞、摩擦阻尼等复杂因素。更进一步的，模型需集成不确定性量化模块，通过蒙特卡洛模拟或区间分析评估参数波动（如材料弹性模量、风载系数）对负载响应的敏感性，为鲁棒性设计提供依据。理论模型的深度不仅在于其数学严谨性，更在于其能将物理现象抽象为可计算的工程语言，为吊装方案优化与安全控制提供科学基石。

2. 数值模拟技术

数值模拟技术为风电发电机吊装作业中起重臂负载分析提供了强大的工具，其通过高精度建模与多物理场耦合计算，能够揭示复杂工况下的力学行为。在有限元分析中，起重臂模型通常被划分为六面体或四面体网格，单元尺寸控制在关键区域（如变截面处、吊点连接部）小于50毫米，以确保应力梯度捕捉的准确性；材料参数则基于实验数据输入，如Q345钢材的弹性模量取206 GPa，泊松比设为0.3，并通过双线性随动硬化模型模拟塑性变形。动态仿真中，采用显式时间积分算法处理大变形问题，时间步长需小于结构最小自振周期的1/10，例如对于固有频率5 Hz的起重臂，时间步长需控制在0.005秒以内，以避免数值阻尼影响结果。风载模拟则结合CFD（计算流体力学）与随机振动理论，输入12级风速谱（如Kaimal谱）及湍流强度参数（通常取0.2~0.3），计算叶片气动力并映射至起重臂节点。多体动力学仿真进一步耦合设备运动与起重臂弹性，考虑接触刚度（如 $1e6$ N/m）与摩擦系数（如0.15）对负载传递的影响。通过参数化扫描分析，可系统评估起重量（如100~150吨）、吊装幅度（如10~30米）等变量对关键截面应力的影响，为极限工况下的安全裕度设计提供量化依据。

3. 现场实测与验证

现场实测与验证是确保风电发电机吊装作业中起重臂负载分析可靠性的关键环节，其通过物理量测与模型校核的闭环反馈，弥合理论计算与工程实际之间的偏差。在实测阶段，采用高精度传感器网络对起重臂关键部位进行全周期监测，例如应变片以5毫米栅长贴附于高应力区，配合动态数据采集系统实现1000 Hz采样频率，捕捉瞬时应力波动；倾角传感器与激光测距仪则联合测定起重臂末端三维位移，空间分辨率可达毫米级。风载测量依赖超声风速仪与风压传感器阵列，同步记录风速、

风向及风压分布，为CFD模型提供边界条件校准数据。验证过程需构建多源数据融合框架，将实测应变数据与有限元计算结果进行节点级对比，误差阈值通常控制在 $\pm 5\%$ 以内；对于动态响应，通过模态分析提取实测频率与阻尼比，与仿真结果进行频域吻合度评估。异常数据需通过小波变换或卡尔曼滤波进行降噪处理，并结合工况日志追溯干扰源，例如突发阵风或操作失误导致的负载突变。最终，基于实测数据修正模型参数（如材料阻尼系数、摩擦因数），形成迭代优化机制，使仿真预测精度提升至工程可用水平，为吊装方案动态调整与安全预警提供实时依据。

四、工程实践中的负载优化策略

1. 吊装方案设计

吊装方案设计是保障风电发电机安全高效安装的核心环节，需综合考量设备特性、环境约束与作业效率。方案需以动态负载分析为基础，优化吊装路径以规避障碍物并减少设备摆动，例如采用“S”型轨迹降低风载冲击，或通过预紧装置控制叶片摆动幅度在3度以内。分阶段吊装策略可平衡负载分布，如先完成塔筒组装再吊装机舱，最后进行叶片安装，每阶段需精确计算起重臂幅度与起重量，确保工作半径不超过额定值的80%。针对复杂地形，需结合三维激光扫描与BIM技术建立场地模型，模拟不同起重机站位对负载稳定性的影响，选择支腿沉降量最小且配重分布均衡的位置。方案中还需嵌入应急响应机制，预设超载预警阈值（如额定负载的110%）及设备故障处置流程，确保突发情况下能快速切换至安全模式。通过多工况仿真验证方案的鲁棒性，最终实现吊装时间缩短20%以上且安全风险可控的目标。

2. 安全措施强化

安全措施强化是风电发电机吊装作业风险防控的关键，需构建多层次防护体系以应对动态负载与复杂环境挑战。物理防护层面，应在起重臂关键节点加装应力监测传感器，实时捕捉超载信号并触发自动报警，同时设置机械限位装置防止设备摆动超限，例如叶片吊装时采用双钩同步控制系统，确保摆动角速度低于 $0.5^\circ/s$ 。人员防护方面，需划定半径50米的危险区域并实施电子围栏监控，作业人员配备智能安全帽与定位手环，活动轨迹异常时自动推送撤离指令。环境适应性措施包括实时监测风速风向，当瞬时风速超过10m/s时启动延时作业程序，并配置防风锚定装置以抵御突发阵风。应急预案需

细化到设备层级，如起重机主钩故障时快速切换至备用吊具，并预设逃生通道与医疗救援响应路径。通过冗余设计与智能监控的深度融合，将事故概率降至百万分之一以下，保障全周期作业安全。

3. 人员培训与应急准备

人员培训与应急准备是风电发电机吊装作业安全链条的重要环节，需通过系统性能力提升与预案演练构建快速反应机制。培训内容应覆盖动态负载识别、设备操作规范及环境风险预判，例如通过虚拟现实模拟不同风速下的吊装场景，使操作人员掌握摆动幅度控制技巧与紧急制动时机，误差容忍度需控制在 $\pm 5\%$ 以内。应急准备方面，需建立分级响应体系，针对超载、设备倾覆等典型事故制定专项预案，明确指挥协调、技术支援及现场处置流程，例如设置双岗确认制度，确保吊装参数复核无误。实战化演练每季度开展一次，模拟突发阵风导致负载失衡场景，检验人员从发现异常到完成设备锚定的全流程响应能力，平均耗时需压缩至3分钟以内。此外，需构建知识共享平台，将历史事故案例与处置经验数字化归档，通过智能推送系统实现风险预警与技能迭代，确保团队始终保持高度戒备与协同作战能力。

结论

风电发电机吊装作业中，起重臂负载受静态与动态因素共同影响，需通过理论建模、数值模拟及现场实测相结合的方法进行全面分析。优化吊装方案、强化安全措施及提升人员技能，可有效降低负载风险，保障作业安全。未来研究可进一步探索智能监测技术与自适应控制策略，推动风电吊装向智能化、精细化方向发展。

参考文献

- [1] 杨威. 风电机组单叶片吊装探析[J]. 中国设备工程, 2023 (S1): 135-138.
- [2] 乐韵斐, 童彦. 风电机组叶片吊装机械手夹持系统特性分析[J]. 风能, 2015 (2): 6.
- [3] 张程远, 盛雷. 海上风力大发电机组吊装技术研究[J]. 水电与新能源, 2022 (008): 036.
- [4] 鲍习飞. 风电机组维护用吊装装置建模与分析[D]. 新疆农业大学, 2016.
- [5] 杨清清. 风电吊装履带起重机臂架非线性分析与拓扑优化[D]. 太原科技大学, 2017.