

# 风电场风机叶轮组装及吊装浅析

王月华 贺 瑞 赵建忠

内蒙古华电锡林浩特新能源有限公司 内蒙古 锡林浩特 026000

**摘 要:** 在全球能源转型与风电产业快速发展背景下, 风机叶轮作为核心部件, 其组装与吊装质量直接影响风电场发电效率与安全。本文系统梳理了叶轮结构组成与组装技术原理, 阐述了组装前场地、人员、设备、部件的准备工作, 明确现场组装各环节流程与关键工艺, 同时设计吊装方案并提出施工过程控制要点。研究结合工程实操需求, 从精度控制、安全管理、质量保障角度, 构建叶轮组装与吊装的完整技术体系, 为风电场叶轮施工提供规范指导, 有助于提升叶轮安装效率与安全性, 保障风电场后续稳定运营。

**关键词:** 风电场; 风机叶轮组装; 流程与工艺; 吊装方案设计; 过程控制

**引言:** 当前风电场风机叶轮大型化趋势下, 组装精度要求提升, 吊装环境复杂度增加, 现有施工中易出现精度偏差、安全风险等问题。基于此, 本文聚焦风机叶轮组装及吊装关键环节, 深入分析技术原理、准备工作、流程工艺、方案设计与过程控制, 旨在解决实操中的技术难点, 为行业提供科学、规范的施工参考, 推动风电工程施工技术标准化发展。

## 1 风机叶轮结构与组装技术基础

### 1.1 风机叶轮组成部件

风机叶轮核心组成部件包含叶片、轮毂与变桨系统。

(1) 叶片整体呈流线型结构, 由复合材料制成, 表面需保证光滑度与结构完整性, 其几何参数需符合特定设计标准。(2) 轮毂为中空式结构, 内部设有连接法兰与安装接口, 法兰处预留均匀分布的螺栓孔, 接口尺寸需与叶片、主轴的连接端相匹配。(3) 变桨系统由变桨电机、减速器、轴承及控制模块构成, 各组件需集成于轮毂内部, 且各部件的安装位置需满足机械传动与信号传输的协同要求。

### 1.2 叶轮组装技术原理

叶轮组装须遵循精度控制、连接紧固与密封防护三大技术原理。(1) 精度控制方面, 需以轮毂中心轴线为基准, 确保叶片安装后的角度偏差、位置偏差控制在规定范围内, 通过专用定位工装实现部件的精准对位。(2) 连接紧固原理以螺栓连接为核心, 需根据部件材质与受力情况计算螺栓预紧力, 采用分步紧固方式, 按照对称顺序施加扭矩, 保证连接面受力均匀。(3) 密封防护原理要求在部件对接面设置密封件, 密封件需与连接面贴合紧密, 同时对螺栓连接部位进行防护处理, 避免外部环境对连接结构产生影响<sup>[1]</sup>。

## 2 风机叶轮组装前准备工作

### 2.1 场地规划与布置

选址须避开地质松软区域及障碍物, 保证场地平整度误差符合规定。按部件重量与设备荷载确定场地硬化混凝土强度等级, 硬化层厚度经受力验算防沉降。部件存放区划分独立分区, 轮毂、叶片设专用支架(高度与间距匹配部件尺寸防变形); 辅助材料区做好防潮防尘, 与作业区保持安全距离。场内规划环形作业通道, 宽度满足吊车、运输车辆通行, 设置明显区域标识与安全警示线。

### 2.2 人员配置与培训

按作业流程明确岗位分工: 技术人员需持风机组装资质, 负责工艺指导与技术交底; 操作工熟悉设备操作规范并持操作证; 安全员持安全管理资质, 全程监督作业安全。岗前培训含技术(组装工艺、质量标准、设备操作)与安全(高空作业规范、应急预案、防护装备使用)模块, 培训后经理论与实操考核, 合格方可上岗, 且需定期复训更新知识与安全意识。

### 2.3 设备与工具准备

设备选型匹配组装需求: 吊车吨位、起升高度适配部件重量与作业要求, 使用前检查制动、液压系统防故障; 定位工装与叶轮尺寸匹配且精度达标, 使用前校准。工具涵盖测量(水平仪、卷尺定期校验保精度)、紧固(扭矩扳手预设预紧力并查准确性)、辅助(绳索、吊具查磨损防断裂腐蚀)类。所有设备与工具建台账, 记录使用状态与维护时间, 使用前全面检查, 不合格者禁用。

### 2.4 部件验收与预处理

按设计图纸与技术规范验收: 外观查部件表面裂纹、变形、损伤及涂层完整性; 尺寸检测用专用工具查叶片长度、轮毂法兰孔径等关键尺寸, 偏差控制在允许范围。验收合格后预处理: 部件表面用专用清洁剂清灰尘油污

防影响组装精度；叶片、轮毂连接部位涂专用润滑脂增密封性与耐磨性；暂不组装部件覆防护膜防潮防晒，避免受潮或紫外线老化。预处理后做好记录，确保部件状态达标。

### 3 风电场风机叶轮现场组装流程与关键工艺

#### 3.1 轮毂定位与固定

轮毂定位与固定是叶轮组装的基础环节，要严格控制定位精度，避免后续组装偏差，具体流程与工艺如下：(1)组装平台清理与校准：先清除组装平台表面杂物、油污，使用水平仪检测平台平整度，确保偏差控制在设计允许范围内；若平台存在局部不平整，需采用垫片找平，保证平台整体受力均匀。(2)轮毂吊装就位：采用专用吊具连接轮毂吊点，吊具与轮毂接触部位需垫缓冲垫，防止损伤轮毂表面；起吊过程中控制起升速度，避免轮毂摆动，缓慢将轮毂放置于组装平台的定位工装上方。(3)轮毂初步定位：根据定位工装的基准线，调整轮毂位置，使轮毂中心轴线与工装基准线重合；使用百分表检测轮毂法兰面的平面度，记录初始偏差数据，为后续精准调整提供依据。(4)轮毂固定与精度复核：通过工装的调节螺栓固定轮毂，先预紧螺栓确保轮毂不位移，再用激光定位仪检测轮毂中心轴线的垂直度与水平度；若偏差超出允许范围，需微调调节螺栓，直至各项精度指标达标，最后按规定扭矩紧固固定螺栓，完成轮毂定位。

#### 3.2 叶片与轮毂对接工艺

叶片与轮毂对接是组装核心环节，需重点控制对接间隙与叶片角度，确保连接稳定性，具体流程与工艺如下：(1)叶片预处理与吊点设置：清理叶片根部法兰表面的保护膜与杂质，检查法兰螺栓孔的垂直度与清洁度；根据叶片重量与重心位置，在叶片规定位置安装专用吊具，吊具与叶片接触部位需包裹防滑垫层，防止叶片表面划伤。(2)叶片起吊与姿态调整：启动吊车缓慢起吊叶片，起吊过程中安排专人通过牵引绳控制叶片姿态，避免叶片与地面或其他部件碰撞；当叶片根部法兰接近轮毂法兰时，降低起升速度，通过吊车变幅与回转动作，使叶片法兰与轮毂法兰初步对齐。(3)对接间隙控制与定位：使用塞尺检测叶片法兰与轮毂法兰之间的对接间隙，确保间隙均匀且不超过设计值；若存在局部间隙过大，需微调叶片姿态，必要时采用薄垫片填充（垫片材质需与法兰材质匹配）；使用角度仪检测叶片安装角度，确保角度偏差符合技术规范。(4)临时固定与位置确认：在叶片法兰与轮毂法兰的螺栓孔中插入定位销，实现叶片临时固定；再次复核叶片角度与对接间隙，确认无误后，安装部分临时连接螺栓并预紧，防止后续工序中叶片位移<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 螺栓连接与紧固工艺

螺栓连接是保证叶轮结构强度的关键，需严格遵循紧固顺序与扭矩要求，具体流程与工艺如下：(1)螺栓与螺栓孔预处理：检查螺栓的规格、材质是否符合设计要求，清除螺栓表面的油污与锈蚀；用专用清洁剂冲洗轮毂与叶片法兰的螺栓孔，确保孔内无杂质，必要时用丝锥修复螺纹损伤部位，保证螺栓顺利安装。(2)螺栓安装顺序规划：根据法兰螺栓分布情况，制定对称式安装顺序（通常按顺时针或逆时针方向，从法兰中心向边缘逐步扩展）；安装螺栓时，需在螺栓螺纹部位涂抹专用防咬合剂，避免后续拆卸困难，同时确保螺栓完全插入螺栓孔，无歪斜现象。(3)分步预紧与扭矩检测：采用扭矩扳手进行分步预紧，第一步按规定扭矩的30%紧固所有螺栓，第二步按50%紧固，第三步按80%紧固；每步预紧后，用扭矩检测仪抽检螺栓扭矩值，确保偏差不超过 $\pm 5\%$ ，若发现扭矩不足，需重新紧固。(4)最终紧固与标记：完成预紧后，按设计规定的最终扭矩紧固螺栓，紧固过程中保持扭矩扳手匀速施力，避免瞬间冲击力损坏螺栓；所有螺栓紧固完成后，在螺栓与法兰结合部位涂抹标记漆，标记紧固状态，便于后续检查。

#### 3.4 变桨系统集成与调试

变桨系统集成直接影响叶轮运行性能，需确保各组件安装协同、调试达标，具体流程与工艺如下：(1)变桨组件安装准备：清理轮毂内部安装空间，检查变桨电机、减速器、轴承的外观与型号，确认接线端子无损坏；根据安装图纸，在轮毂内壁标记各组件的安装位置，确保组件安装后不影响叶片转动。(2)变桨组件固定与接线：将变桨电机与减速器通过螺栓固定在轮毂预设支架上，螺栓紧固扭矩需符合设计要求；安装变桨轴承，调整轴承间隙，确保轴承转动灵活无卡滞；按接线图连接电机、传感器（如角度传感器、温度传感器）与控制系统的线缆，线缆需固定牢固，避免与运动部件干涉，同时做好防水密封处理。(3)空载调试前检查：检查变桨系统的电源电压、接地电阻是否符合要求；手动转动变桨轴承，确认叶片转动范围无阻碍；通过控制系统读取传感器数据，确保数据传输正常，无异常报警信号。(4)空载调试与参数校准：启动变桨系统空载运行，测试叶片从 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 的转动速度与平稳性，调整电机转速参数，确保转动过程无抖动；校准角度传感器，使叶片实际角度与控制系统显示角度一致，偏差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内；测试紧急停机功能，模拟断电、故障等场景，确认变桨系统能快速将叶片调整至安全位置，调试完成后记录各项参数，形成调试报告。

## 4 风机叶轮吊装方案设计

### 4.1 吊装场地勘察与评估设计

勘察场地地形坡度,确保不超过吊车作业允许范围;采用重型动力触探法检测地基土承载力,确定土层密实度及是否需加固。测量场地与周边建筑物、高压线路、树木的距离,保证符合安全距离要求,标记空中及地面障碍物并评估是否需移除或避让。对地基承载力不足区域,设计换填垫层或设置钢板路基箱,明确垫层厚度、钢板规格及铺设范围,同时规划雨水排水坡度,避免场地积水。

### 4.2 吊装设备选型与配置设计

根据叶轮重量、安装高度及作业半径,计算吊车额定起重量与臂长,确定汽车吊或履带吊类型及吨位,确保额定起重量留1.2倍以上安全系数。设计专用吊具,明确其材质、承载能力及与叶轮连接方式;配置牵引绳并确定绳径与长度以控制叶轮姿态;配备风速仪、力矩限制器等监测设备,实现作业参数实时监控。

### 4.3 吊装受力分析与验算设计

依据叶轮重心位置,确定吊点数量与分布,计算各吊点受力大小,保障吊点强度满足荷载要求。根据吊点受力与吊装角度计算钢丝绳拉力,对比其破断拉力,确保安全系数不低于5倍,同时验算吊具与叶轮连接部位局部受力,防止部件变形。计算吊车支腿对地基的压力,与地基加固后承载力对比,确保压力不超允许值,避免地基沉降。

### 4.4 吊装流程与路径设计

规划叶轮吊装完整步骤:低速起吊至离地面0.5米停顿检查,再匀速回转至机舱正下方,调整臂长使叶轮接近机舱,最后缓慢对接机舱主轴,明确各步骤操作速度与控制要求。规划吊车行驶路线与支腿摆放位置,保证支腿均匀受力;设计人员作业路径,使其与吊装作业半径保持安全距离,规避交叉作业风险<sup>[1]</sup>。

## 5 风机叶轮吊装施工过程控制

### 5.1 吊装前安全检查与确认

吊装前要全面排查风险,确保施工条件达标:检查吊车制动、液压系统,确认无故障;查看吊具、索具磨损,测钢丝绳直径,连接松动或磨损超标立即更换。核查索具与叶轮连接,确保吊点对重心、绑扎牢固;用风速仪测风速,不超允许上限,能见度达标,恶劣天气暂停。核对人员到位,操作人员、指挥、安全员各司其职,对

讲机信号畅通,检查结果存档,确认无误启动吊装。

### 5.2 叶轮起吊与姿态控制

起吊需精准控速与姿态,防晃动碰撞:吊车低速起升,叶轮离地面10-20厘米暂停,查吊具受力与水平度,水平仪检测倾斜则调索具,水平后继续。起升保持匀速,忌急加减速,专人用牵引绳控姿态防摆动;叶轮升至指定高度,控吊车回转速度,调位置时确保与周边设备、建筑留安全距离,无碰撞风险。

### 5.3 叶轮与机舱对接安装

对接需严控精度,确保与主轴衔接:叶轮到机舱正下方,慢调吊车变幅与起升高度,使法兰靠近,激光对准仪监测同轴度,调位置确保偏差合规。机舱内人员辅助定位,先插2-3根定位销固定,再对称装连接螺栓,忌强行敲击防螺纹损伤;螺栓装完用扭矩扳手按规定分阶段紧固,每轮后复查法兰间隙,确保均匀无松紧不均。

### 5.4 吊装后设备拆卸与场地清理

吊装后规范收尾,防设备损耗与隐患:按规程收缩吊车臂架、放支腿,确保行驶稳定;拆吊具、索具轻拿轻放防碰撞,清表面杂物后分类存,做好防潮防锈。清场地时,收包装材料、螺栓垫片等废弃物,分类堆指定区域防污染;查场地无工具、配件遗留,平整场地并修复地面破损,恢复原貌或符合后续要求<sup>[4]</sup>。

结束语:本文全面探讨风电场风机叶轮组装及吊装技术,明确各环节核心要点与控制方法,形成从技术原理到实操落地的完整指导体系,可有效降低施工偏差与安全风险,提升安装质量。随着风电技术迭代,建议进一步结合智能化设备与数字化管理手段,优化组装与吊装工艺,助力风电工程向更高效、更安全、更智能方向发展,为能源转型提供更强支撑。

### 参考文献:

- [1]徐庆淳.3.3MW级风力发电机组叶轮整体吊装方案研究[J].水利水电施工,2024(6):97-101.
- [2]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.
- [3]张程远,项建强.10MW海上风力发电机组风轮吊装技术研究[J].水电与新能源,2022,36(5):48-51.
- [4]文言.风机吊装量化干涉技术的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(8):045-048.