

风电项目风机吊装施工技术的探讨

毛兴文

陕西德源府谷能源有限公司 陕西 榆林 719000

摘要:随着风电产业的快速发展,风电项目建设规模不断扩大,风机吊装作为风电建设的关键环节,其施工技术直接影响项目安全、质量与进度。本文围绕风电场风机吊装施工技术展开探讨,阐述了风机的结构组成,分析了技术应用要遵循的安全、经济及效率原则。详细介绍了吊装前的场地勘察、设备材料与技术人员准备工作,重点研究了核心部件吊装工艺优化、复杂环境适应性、安全控制、质量保障及效率提升等关键技术。通过对各环节技术要点的梳理,为风电项目风机吊装施工提供了全面的技术参考,旨在提升吊装施工的安全性、经济性与效率,保障风机设备的稳定运行。

关键词:风电场;风机吊装施工;关键技术

引言:风机结构复杂,吊装具有“高、重、精”特点,且常面临山地、沙戈壁、海上等复杂环境挑战。目前行业对吊装技术的安全性、经济性与效率性要求日益提高。本文结合实际施工需求,从技术概述、前期准备、关键技术等方面深入探讨风电项目风机吊装施工技术,为解决吊装过程中的技术难题、规范施工流程提供理论与实践指导。

1 风电场风机吊装施工技术概述

1.1 风机结构组成

风电场风机主要由以下塔筒、机舱、传动链、轮毂及叶片等核心部件构成,各部件的结构特性决定了其独特的吊装要求。(1)塔筒作为支撑结构,多采用分段式混凝土、钢制圆筒或者混凝土与钢制圆筒组合设计,单段重量可达80-150吨,高度30-100米,吊装时要严格控制垂直度(偏差需 $\leq 1\%$),且分段对接处的法兰连接精度直接影响整体稳定性。(2)机舱集成了发电机、齿轮箱等精密设备,重量通常在80-200吨,其吊装需精准定位机舱与塔筒顶部的连接法兰,避免因受力不均导致设备损坏。(3)叶片与轮毂组装后形成风轮,单叶片长度可达60-135米,重量约15-30吨,由于叶片呈细长流线型,吊装时易受风力影响产生摆动,采用专用吊具控制姿态,且叶片与轮毂的高强度螺栓连接需严格按预紧力标准执行,防止运行中出现松动。

1.2 技术应用原则

风电场风机吊装技术的应用要遵循以下三大原则:

(1)安全性原则。通过多维度措施保障施工安全:吊装机械需经过载荷试验验证,确保起重性能满足工况要求;作业前需根据风速(通常要求 $\leq 10\text{m/s}$)、能见度等气象条件评估施工可行性;高空作业人员必须配备防

坠落装置,且所有连接节点需经二次校验。(2)经济性原则。要求优化资源配置,在满足技术要求的前提下,通过合理选择吊装机械(如根据风机吨位选择履带吊、汽车吊、或者“履带吊+汽车吊”组合方案)、缩短吊装周期(如采用模块化预组装技术减少高空作业时间)等方式降低施工成本,同时避免因过度追求低价导致设备选型不足或材料质量隐患。(3)效率性原则。强调流程协同,需通过BIM技术模拟吊装路径、制定多工序平行作业计划(如塔筒吊装与叶片组装同步进行)等手段,减少机械闲置与工序等待时间,在保证质量的基础上提升施工进度,尤其在山地、沙戈壁、海上等复杂场景中,效率优化可显著降低环境因素对工期的影响^[1]。

2 风电场风机吊装前的准备工作

2.1 施工场地勘察与规划

施工场地勘察要结合地形图与实地测绘,重点分析地形地貌对吊装的影响:山地风场需评估坡度(建议 $\leq 15^\circ$)、山体稳定性及避风条件;平原风场要排查地下管线、构筑物及地表承载力。场地平整与硬化需根据吊装机械参数设计,主吊装区硬化厚度不低于20cm,采用C30混凝土并设置钢筋网,硬化前需碾压夯实,周边设排水坡度及截水沟。运输通道设计需满足风机部件运输要求,单车道宽度 $\geq 4.5\text{m}$,转弯半径根据最长叶片(通常60-135m)确定($\geq 30\text{m}$),路面承载力需达 30t/m^2 ,软弱路段采用级配碎石换填或钢板铺垫,并设置错车道与临时停车场。

2.2 设备与材料准备

吊装机械选型要匹配风机部件参数:塔筒吊装可选300-500吨级履带吊,机舱吊装需800吨级以上带超起装置的履带吊,叶片吊装可搭配200吨级汽车吊辅助。性能校

验包括：起重机械的力矩限制器、高度限位器等安全装置标定，钢丝绳磨损度检测（断丝率 $\leq 5\%$ ），液压系统压力测试。风机部件验收需核对出厂合格证、材质报告，塔筒检查法兰平面度，叶片检查表面裂纹与配重平衡，所有部件需进行外观与尺寸复核。存储时，塔筒需立放于专用支架（倾斜角 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ），叶片需水平放置在防潮枕木上（间距 $\leq 6\text{m}$ ），机舱需密封防护并避免阳光直射。

2.3 技术与人员准备

施工方案编制要涵盖吊装流程、机械站位图、受力计算等，明确塔筒分段对接顺序、机舱吊装角度等关键参数，并经专家评审。应急预案需针对大风（ $\geq 10\text{m/s}$ ）、设备故障等场景制定响应措施，配备备用吊装索具、应急电源及医疗救护设备。作业人员需持特种作业证上岗，起重司机需有5年以上风电吊装经验，信号工需通过专项考核。培训内容包括：方案交底（重点讲解高空对接精度控制）、安全规程（如高空作业防坠落措施）、应急演练（每月至少1次机械故障处置模拟），考核合格后方可上岗^[2]。

3 风电场风机吊装施工关键技术

3.1 核心部件吊装工艺优化技术

风电场风机核心部件的吊装工艺直接决定施工质量与安全，需针对以下塔筒、机舱、传动链、轮毂等不同部件的特性制定差异化技术方案。（1）塔筒吊装采用“分段对接、逐层找正”工艺。首段塔筒吊装前，需在基础法兰上预装定位销，通过全站仪实时监测塔筒垂直度，起吊至离地面 30cm 时静止5分钟，检查吊具受力与塔筒姿态，确认无误后缓慢就位。对接过程中，利用液压千斤顶微调法兰间隙（控制在 0.5mm 以内），同步采用扭矩扳手按对角顺序紧固螺栓，初拧扭矩达设计值的 50% ，复拧至 100% ，每完成一段吊装需静置2小时，待基础沉降稳定后再进行下一段作业。（2）机舱吊装重点控制“起吊角度与对接精度”。采用四点吊装法，吊点位置偏差不超过设计值 $\pm 5\text{mm}$ ，起吊时保持机舱水平度误差 $\leq 0.3^{\circ}$ ，通过缆风绳控制旋转角度，当机舱接近塔筒顶部时，降低起吊速度至 0.5m/min ，利用塔筒顶部的导向装置实现精准对接，螺栓安装采用“初拧-复拧-终拧”三步法，终拧扭矩需经扭矩扳手二次校验，确保每个螺栓预紧力均匀一致。（3）轮毂、叶片吊装推行“地面预组装+整体吊装”工艺。叶片与轮毂在地面组装时，需使用专用支撑工装固定叶片角度，组装过程中实时监测叶片根部法兰面的平面度（偏差 $\leq 0.1\text{mm/m}$ ），螺栓紧固后进行动平衡测试。整体起吊时，主吊与辅助吊协同作业，主吊负责垂直提升，辅助吊控制风轮水平位移，当风轮

离地 3m 时拆除辅助吊，通过调整主吊角度使风轮轴线与机舱主轴轴线重合，对接时保持吊装速度 $\leq 0.3\text{m/min}$ ，避免部件碰撞产生应力集中。

3.2 复杂环境下的吊装适应性技术

复杂地形与气象条件对吊装施工构成显著挑战，要通过以下针对性技术措施提升施工适应性。（1）山地、沙戈壁风场吊装采用“地形适配性机械配置”技术。根据山体坡度选择带超起装置的履带吊，坡度超过 10° 时，在履带下方铺垫楔形钢板调整机身水平度，并采用“桩基+钢板”组合式地基加固方案，桩基深度不小于 3m ，顶部铺设 20mm 厚钢板分散载荷。吊装路径规划需避开山体阴影区与强风通道，利用无人机三维建模技术模拟吊装半径，确保机械站位与部件运输路线的安全距离 $\geq 50\text{m}$ 。（2）海上风场吊装重点应用“抗风浪协同作业”技术。选择具有DP3级动力定位系统的吊装船，作业前根据波浪预报确定窗口期，起吊时通过船载姿态传感器实时补偿船体晃动（补偿精度 $\pm 0.5^{\circ}$ ）。塔筒吊装采用“导向架+液压顶推”装置，在波浪周期内完成法兰对接，螺栓紧固采用液压同步张拉技术，减少海上振动对预紧力的影响。叶片运输采用专用海洋运输架，架体与船体之间设置缓冲装置，降低颠簸导致的叶片结构损伤。（3）特殊气象条件下的施工要实施“动态监测与应急调整”技术。风速监测采用三维超声风速仪，当瞬时风速超过 8m/s 时，停止叶片与机舱吊装；温度低于 -10°C 时，对液压系统采取预热措施，螺栓紧固前需进行低温预紧力修正。雨雪天气后，需检测吊具摩擦系数，对结冰的部件表面进行除冰处理，必要时铺设防滑垫，避免吊装过程中出现打滑现象^[3]。

3.3 吊装安全控制核心技术

安全控制要通过以下机械状态监测、作业边界管控、风险预警等技术构建全方位防护体系。（1）吊装机械安全监控采用“物联网+传感技术”。在吊车关键部位安装应力传感器（吊臂根部、回转支撑）、倾角传感器和载荷限制器，实时采集吊重、幅度、角度等参数，当监测值超过安全阈值时，系统自动发出声光报警并切断起升动力。定期对液压系统进行油液分析，通过检测油液污染度和金属磨粒含量，提前预判液压泵、油缸的潜在故障。（2）高空作业安全防护依赖“立体防护与智能预警”技术。塔筒爬梯设置防坠导轨，作业人员配备双钩式安全带，在塔筒平台与机舱入口处安装红外感应报警装置，当人员未按规定系挂安全带时触发警报。叶片吊装时，在叶尖设置牵引绳控制摆动幅度，主吊钢丝绳采用防扭转结构，连接部位安装拉力传感器，实时监

测索具受力均匀性,避免单根绳索过载断裂。(3)交叉作业安全管控应用“空间隔离与时序优化”技术。通过BIM技术划分各吊装区域的空间边界,设置硬性隔离设施(如防护网、警示带)。多台机械协同作业时,采用无线同步控制系统,确保各吊点起升速度差 $\leq 0.1\text{m/min}$,避免部件产生附加应力。

3.4 吊装质量保障技术

风机吊装质量直接影响设备运行寿命,要通过以下精准测量、连接强度控制、过程记录等技术手段实现全流程管控。(1)安装精度控制采用“多维度测量”技术。塔筒垂直度采用全站仪进行多点监测(每10m一个监测点),累积偏差控制在 $H/1000$ (H 为塔筒高度)以内;机舱主轴与水平面的夹角通过倾角仪测量,偏差不超过设计值 $\pm 0.1^\circ$;叶片安装角度采用激光对中仪校准,三个叶片的角度差 $\leq 0.5^\circ$ 。所有测量数据需在环境温度稳定(2小时内温差 $\leq 5^\circ\text{C}$)的条件下采集,避免温度变形导致误差。(2)连接部位强度保障依赖“螺栓预紧力控制”技术。根据螺栓规格采用液压拉伸器或扭矩倍增器施加预紧力,施加过程分三次进行(30%、70%、100%设计值),每次间隔15分钟,确保应力均匀释放。预紧完成后,采用超声波检测仪检查螺栓伸长量,实测值与理论值的偏差需 $\leq 5\%$ 。法兰面密封采用专用密封胶,涂抹厚度均匀(1-2mm),螺栓孔周边需无胶瘤,确保密封性能。(3)质量追溯采用“数字化记录”技术。每个部件吊装过程配备专用记录仪,实时拍摄安装过程(分辨率 $\geq 1080\text{P}$),关键工序(如法兰对接、螺栓紧固)需拍摄特写视频并标注时间戳。所有测量数据、预紧力值、作业人员信息录入区块链系统,形成不可篡改的电子档案,便于后期运维追溯。

3.5 吊装效率提升技术

在保证安全与质量的前提下,通过以下流程优化、设备创新、技术集成等手段提升吊装效率,缩短施工周期。(1)吊装流程优化采用“平行作业”技术。在塔筒基础施工阶段,同步进行风机部件运输与存储;首段塔

筒吊装时,地面团队同步开展第二段塔筒的法兰清理与密封胶涂抹;机舱吊装就位后,高空作业人员安装连接螺栓的同时,地面团队开始风轮预组装,实现多工序无缝衔接,将单台风机吊装周期缩短至3-5天。(2)专用设备创新聚焦“模块化与智能化”。研发组合式吊装支架,实现叶片在运输车辆上直接完成与轮毂的组装,减少地面组装时间;应用全自动螺栓拧紧机器人,采用视觉识别技术自动定位螺栓孔,拧紧效率较人工提升3倍,且预紧力控制精度达 $\pm 3\%$ 。大型履带吊配备智能臂架系统,可根据吊重自动计算最优臂长与幅度,缩短工况转换时间。(3)技术集成应用“BIM+数字孪生”技术。吊装前通过BIM模型模拟整个施工过程,优化吊机站位、吊点布置及路径规划,提前发现空间冲突;施工中通过数字孪生系统将现场传感器数据与BIM模型实时关联,动态展示部件姿态、受力状态等信息,指导作业人员精准操作^[4]。

结束语:风电场风机吊装施工技术涉及多方面要点,从前期准备到核心技术应用,每一环都对施工质量至关重要。遵循安全、经济、效率原则,优化核心部件吊装工艺,提升复杂环境适应性,加强安全与质量管控,可有效保障施工顺利进行。随着技术的不断创新,智能化、模块化技术在吊装中的应用将更加广泛,持续推动风电场风机吊装施工技术迈向更高水平,为风电产业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]孙禄.风电场风机吊装施工技术的分析与探讨[J].建筑工程技术与设计,2022,10(16):25-27.
- [2]于德利.风电场风机吊装施工技术的研究与探讨[J].电脑校园,2020(6):2396-2397.
- [3]邓晓光.风电场风机吊装施工技术的探讨[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(12):188-191.
- [4]邓声宝,周清,李泉.风电场风机吊装施工技术的探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(10):92-95.