

风机机舱叶轮一体化吊装施工关键技术探析

王 畅

天津红泰扬新能源有限公司, 天津 300000

[摘要]随着风电机组单机容量持续增大,机舱与叶轮的重量和尺寸不断攀升,传统分体吊装方式在施工效率与安全性方面面临严峻挑战。机舱叶轮一体化吊装技术将机舱与在地面完成组装的叶轮作为一个整体单元进行一次性吊装就位,已成为大型风电机组安装的主流工艺。文中系统分析了风机机组的结构组成与吊装特点,从吊装施工方案设计、机舱叶轮组合安装、大型设备整体吊装控制、吊装施工测量与精度控制四个维度深入剖析了该技术的核心要点,并提出了推进数字化设计、加强智能监测、优化设备协同管理、完善安全管控体系等优化策略,以期同类工程提供技术参考。

[关键词]风机吊装;机舱叶轮一体化;整体吊装;精度控制;智能监测

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20209

中图分类号: TK81

文献标识码: A

Analysis of Key Technologies for Integrated Hoisting Construction of Wind Turbine Nacelle Impeller

WANG Chang

Tianjin Hongtaiyang New Energy Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract: With the continuous increase in single unit capacity of wind turbines, the weight and size of the nacelle and impeller continue to rise, and the traditional split lifting method faces severe challenges in terms of construction efficiency and safety. The integrated hoisting technology of the engine room impeller lifts the engine room and the impeller assembled on the ground as a whole unit in one go, which has become the mainstream process for the installation of large wind turbines. The article systematically analyzes the structural composition and lifting characteristics of wind turbine units, and deeply analyzes the core points of this technology from four dimensions: lifting construction scheme design, engine room impeller combination installation, overall lifting control of large equipment, lifting construction measurement and accuracy control. Optimization strategies such as promoting digital design, strengthening intelligent monitoring, optimizing equipment collaborative management, and improving safety control systems are proposed to provide technical references for similar projects.

Keywords: fan hoisting; integrated engine room impeller; integrated hoisting; precision control; intelligent monitoring

引言

风力发电是清洁能源的重要组成,近几年来,在全世界范围内得到了迅速的发展。风电机组正朝着大容量、高塔筒、长叶片方向发展,单机容量由原来的兆瓦级向 6MW、8MW 甚至 10MW 以上发展。由于机组大型化吊装施工从来没有过如此大的挑战,机舱重量达 150t 以上、叶轮直径 220m 以上、轮毂中心高超过 160m。风机吊装施工技术属于风电场工程施工的重要技术,高山风电风机吊装为危大工程作业,如何保证主吊选型、风电吊装过程安全和质量,一直是风电行业所关注的问题。在这种情况下,机舱叶轮一体化吊装技术就产生了。该技术把机舱和在地面上完成叶片-轮毂组装的叶轮作为一个整体单元进行吊装,

比分体吊装减少高空作业次数,缩短施工工期,降低安全风险。但是一体化吊装对于起重设备的起重能力、吊装精度控制、风载应对等各方面提出了更高的要求。本文主要对风机机舱叶轮一体化吊装施工的关键技术进行系统的分析,给工程实践提供理论支持。

1 风机机组结构组成及吊装特点

大型水平轴风力发电机组主要是由塔架、机舱、叶轮和控制系统等几个主要部分组成。塔架是风力发电机的安装支撑结构,常见的有圆锥型钢管塔架、混凝土塔架等,用来把机组整体支撑到高空。机舱设在塔架顶部,为流线型外壳体,内有齿轮箱、发电机、主轴、偏航系统等主要传动和发电部件,是风力发电机组的心脏。叶轮由轮毂和

2~3 个叶片组成,叶片有空气动力外形,捕获风能并转化为机械能。随着单机容量的增大,各个部件的尺寸和重量也變得越来越大,8MW 风机五段塔筒总重达到 508t,叶片长度超过 80m。风机吊装有明显的特點。第一,吊装作业高度大、重量大,轮毂中心高度一般都在 100m 以上,机舱和叶轮的吊装重量常常是百吨到数百吨,对起重设备的性能要求很高。第二,受风况影响大,叶轮整体吊装时迎风面积大,犹如在高空托举一个巨大的“降落伞”,任何角度偏移或者风力冲击都会造成灾难性的摆动。一般情况下吊装风速不大于 8m/s,叶轮吊装时风速更小一些,一般控制在 5m/s 左右。第三,高空对接精度要求高,机舱和塔顶法兰、叶轮和机舱传动链主轴对接精度要求毫米级^[1]。第四,施工场地及运输条件较为复杂,由于地形不同(山地、戈壁、沿海等),风电场对于吊装设备的进场、转场、站位等提出了不同的要求。这些特点决定机舱叶轮一体化吊装要依靠多种技术手段来保证施工安全和质量。

2 风机机舱叶轮一体化吊装施工关键技术分析

2.1 吊装施工方案设计技术

吊装施工方案设计是一体化吊装的第一步,决定着后面施工是否可行、经济。方案设计的关键之处在于主吊设备的选择和工况的确定。设计人员要依照风机各个部件(塔筒、机舱、叶轮)的重量、尺寸以及安装高度,结合施工现场的地形状况、地基承载能力、作业空间等要素,全面比较选择履带起重机或者全地面起重机的型号和工况配置。5MW 风机采用整体吊装方式一般需要 1600t 履带吊,经过施工方案的优化可选用 1000t 履带吊满足施工要求,从而达到降本的目的。起重机选型要符合最大起吊重量的要求,还要校核不同吊装高度下起重性能曲线,在目标高度上留有足够安全余量。对于轮毂高度大于 170m 的风力发电机组吊装过程中遇到的“超高、超重、超复杂”技术难题,要创建起“高度-载荷-风况”三要素结合的动态模型,借助有限元分析来量度风致振动风险,从而加强吊装设备的选择可信度。

方案设计还要考虑吊装过程的安排,确定各个工序的先后顺序、机械站位、吊索具选择和作业人员分工。风电吊装具体流程为吊装准备、支架安装、电抗器及电控柜就位、塔架三段依次吊装、机舱吊装(若机舱不含发电机)、发电机吊装(若机舱含发电机)、叶轮组合及吊装。一体化吊装中机舱吊装和叶轮吊装虽然流程上是两个独立的环节,但是两者之间存在着设备选型、工况转换、精度控制等方面的密切联系,在方案设计阶段就需要进行一体化统筹。

2.2 机舱叶轮组合安装技术

机舱叶轮组合安装技术包含机舱吊装就位和叶轮地面组装两个部分,二者一起构成一体化吊装的前置基础。机舱吊装时,根据风电机型确定机舱吊点布置情况,用配套的专用吊具起吊。为了防止机舱起升时旋转、磕碰主吊机械或者塔筒,在地面设置导向风绳来控制起升方位。机舱就位之后要及时完成与塔顶法兰的高强螺栓连接,用专用电动扳手预紧到设计力矩值。

叶轮组合安装是在地面完成叶片和轮毂的组装工作。工程师用专用工装架,用±1 毫米的精度把叶片和轮毂对准。叶片吊装一般采用“组合安装”施工方案,即在地面组合风机叶片和轮毂,待打完轮毂和叶片之间的力矩后,再与机舱对接。大型叶轮叶片长度上百米,单支重达 30 多吨,地面组装时需要较大的平整场地以及精密的工装设备。组装完成后还要对叶轮做整体检查,即螺栓紧固力矩复验、叶片角度校准等,保证叶轮满足整体吊装的要求。此次吊装创新采取的是“地面组装、整体起吊”的方式,在风速不大于 5m/s 的情况下,把组装好的叶轮整体吊到 120 米高空,然后准确对接到机舱上。

2.3 大型设备整体吊装控制技术

大型设备整体吊装控制技术属于一体化吊装的重要组成部分,主要解决叶轮整体起吊过程中稳定性控制和高空精准对接这两个问题。叶轮整体吊装的困难之处在于它具有很大的迎风面积以及不均质的质量分布。直径 26m、重 160t 的叶轮全部吊装到 125m 高处,就像在空中托着一个巨大的降落伞。因此现代大型起重机一般都装有智能控制系统,可以对吊钩摆动和重心进行毫秒级的实时监测和自动纠偏,从源头上消除风险^[2]。吊装时,主吊机械和辅吊机械要互相配合,主吊负责叶轮垂直提升,辅吊(溜尾吊)负责叶轮起吊初期姿态控制和递送,待叶轮完全竖直后再由主吊独立完成提升工作。

高空精准对接属于整体吊装控制技术的难处。百米高空,把叶轮和传动链主轴上的螺栓孔严丝合缝地对准,是整体式吊装最考验微操的环节。高空视野受阻,吊物惯性大,传统的“试错”调整此时不能使用。现代大型起重机为此设计了专用的“微动模式”,卷扬和变幅机构可以以毫米级的精度相互配合运动,使叶轮几乎悬浮在空中慢慢、精确地移动。超起装置用配重托盘大大提高了超高工况下抗倾覆稳定性以及起重能力,给吊装全过程提供了一个坚如磐石的支撑点。

2.4 吊装施工测量与精度控制技术

吊装施工测量及精度控制技术是风机安装过程中不

可缺少的一部分，也是保证施工质量的重要手段。从塔筒基础施工开始就要对基础平整度进行复核。塔筒吊装分段进行，每吊装一节塔筒就立即进行垂直度校正，用数字化测量调节保证塔筒笔直竖立。垂直度偏差应控制在千分之一以内，施工时用高精度电子水准仪和全站仪实时监测。机舱吊装就位后安装平面的水平度误差不大于 2mm。叶轮和机舱对接时螺栓孔位对中精度要求很高，用激光定位仪辅助螺栓孔对中可以使对接时间缩短 30%。测量现场地表风速、风向、高空风速、风向，对吊装的轮毂安装独立式倾斜仪监测安装过程中倾斜程度，用应力计测量，最后根据收集到的数据进行分析，用数字化的方式提供给现场作业人员，辅助完成安装作业。各个测量控制项目具体要求可以归纳成表 1。

3 风机机舱叶轮一体化吊装技术优化策略

3.1 推进吊装施工方案数字化设计

传统的吊装方案设计大多依靠工程经验以及手工计算，已经不能满足日益复杂施工环境的要求。推进数字化设计，成为提高方案科学性的一种必然。项目团队使用 BIM 技术，实行“一机一图一策划”的精细化管理方式，在吊装全过程里进行仿真模拟，避免发生风险。BIM 建模可以直观地体现起重机械站位、吊装路径、设备干涉关系，生动地模拟出塔筒运输、翻身、组装全过程，给安装施工提供科学的指导。BIM 同施工进度融合可以达成四维动态模拟，改善工序衔接，缩减停工待时时间。以 Ogre 引擎为基础的三维仿真系统可以创建出高精度的风电设施和吊装设备模型，并对吊索具、起重机进行校核计算。依靠数字化仿真平台，设计人员可以反复地对不同的工况方案加以推演，对比并改良站位、臂架以及超起的设置，特别对风致振动这类动力学问题作出预判，在施工前就可将隐患清除。数字化设计提高了方案编制的效率和准确性，也给施工动态调整赋予了数据支撑，促使吊装施工由依靠

经验的运作形式转变为依靠数据的操作模式。

3.2 加强智能监测技术应用

智能监测技术属于提高吊装施工安全和可控性的主要方式。现场使用多种型号的大型吊车同时作业，用激光定位仪、全站仪、智能风速监测设备、无人机和 60 度全景摄像等先进的手段，对塔筒垂直度、方位角、风速变化和吊装过程进行实时监测。从设备上讲，起重机全身 119 个安全传感器就像灵敏的神经末梢一样，形成全方位的感知网络，对每一次吊装全过程进行全方位的保护。采用应变、振动、倾斜、索力、开合度等传感器可以形成一个完整的结构智能监测系统^[3]。叶轮吊装时，对吊装的轮毂安装独立式倾斜仪进行监测安装过程中的倾斜程度，用应力计进行测量，最后将收集到的数据以数字化方式提供给现场作业人员。智能监测技术的应用，把吊装施工由原来的“靠经验来判断”变成现在的“以数据来驱动”，进而提高吊装施工的精度和安全性。

3.3 优化大型吊装设备协同管理

一体化吊装经常牵涉到主吊、辅吊等多种大型起重设备的配合作业，设备协同管理同施工效率和安全密切相关。风机吊装采取“主吊+辅吊配合”形式，有需要的时候再引进起重机械进场解决施工的“瓶颈”。在设备配置上可以采用 1 台千吨级履带主吊和 1 台百吨级履带辅吊协同作业的方式。协同管理的关键就是准确计算出各个吊车的作业半径、设备自重、吊车站位等重要参数，并且严格控制吊装协同精度。高效的工况转换、快速转场也十分重要，配重分离技术、超起推移系统大大缩短了分体吊装过程中各个部件吊装间隙的工况调整时间，使机舱吊装和叶片吊装无缝对接。另外，对复杂的地形进行详细的运输方案规划，使用测绘无人机对全域进行勘测定点，准确地调整施工道路路线，可以保证大型设备的顺利进场。

表 1 风机吊装施工测量与控制精度要求

测量控制项目	精度/偏差要求	主要检测仪器	检测时机
塔筒垂直度	偏差≤1‰	电子水准仪、全站仪	每节塔筒吊装后
机舱安装水平度	误差<2mm	水平仪、全站仪	机舱就位后
叶片-轮毂对接精度	±1mm	专用工装、激光测量	地面组装阶段
叶轮-机舱螺栓孔对中	毫米级	激光定位仪	叶轮对接阶段
基础平整度	符合设计要求	水准仪	塔筒吊装前
安装倾斜程度	实时监测	独立式倾斜仪	吊装全过程

3.4 完善全过程施工安全管控体系

风机吊装为高危作业,健全全过程的安全控制体系是保证施工安全的根本保障。风机吊装属于风电项目建设的关键部分,具备高风险、高技术要求的特性。施工前需要从风险辨识和控制措施、编制依据、施工计划、人员机具投入、施工工艺技术、施工安全保证措施、应急处置措施、地基承载力计算、吊装计算等各方面编制专项施工方案。根据高空坠物、吊车倾覆、设备坠落等两个高危场景,逐项分解辨识危险源和控制措施共4项^[4]。在施工期间创建起“业主-总包-分包”三级联保体系,每次吊装之前都要对作业人员进行人脸识别认证,吊装方案要经过AI合规性检验以及专家评审的双重审核。安全管理上实行“三级管控”,即施工前的安全技术交底、施工中的联合安全小组全程巡查,在关键工序中引入第三方复检,形成一个完整的管理闭环。全过程实行风速预警制度,关键工序保留影像记录,保证设备安全稳定运行。

4 结语

风机机舱叶轮一体化吊装施工技术属于适应风电机组大型化发展的一种主要施工工艺。本文从吊装方案设计、机舱叶轮组合安装、大型设备整体吊装控制、吊装

施工测量与精度控制四个方面对吊装施工技术进行分析,提出推进数字化设计、加强智能监测、优化设备协同管理、完善安全管控体系等优化措施。随着风电机组单机容量越来越大、塔筒越来越高,一体化吊装技术对精度的要求也越来越高,对风载的抗荷能力也越强。未来要进一步加强BIM技术同数字孪生技术在吊装方案设计方面的应用,健全智能监测和预警系统,促使吊装施工由“靠经验”转向“靠数据”,给风电行业高质量发展赋予强有力的技术支撑。

[参考文献]

- [1]吴亚南,唐珊,李玉红.风机叶轮总成空中对接装置优化设计[J].佳木斯职业学院学报,2019(3):254-255.
- [2]俞志青,俞柯.智能检测技术在风机叶轮装配质量控制中的应用研究[J].仪器仪表用户,2026,33(3):147-149.
- [3]杨坐洪.风电工程风机叶轮整体吊装施工技术研究[J].科学技术创新,2026(2):97-100.
- [4]杜海涛.海上风电项目叶轮整体吊装施工技术探讨[J].企业科技与发展,2023(6):97-101.

作者简介:王畅(1992—),女,汉族,辽宁锦州人,工程师,天津工业大学毕业,现就职于天津红泰扬新能源有限公司,从事工程管理工作。