

[海上风电]

基于石油钻井平台的海上风电吊装技术研究

文/王 坤

中国电建集团贵州工程有限公司

通过研究石油钻井平台转化为海上风电吊装平台及其吊装技术,把节约能源、盘活闲置海工资产、提高施工效率及增加经济效益等理念贯穿于从平台设计阶段到海上风电吊装施工完成的整个过程,经实践能在海上风电安装领域中成功应用,具备海上海工作业的自身优势,特别是深海海工作业,具有很高的操作性、推广应用价值。

现有的海上风电设施中存在一部分是由海上钻井平台改造而来,如公司改造成功并投入使用的CJ46和JU2000E型吊装平台,其平台甲板上设置1 600 t履带起重机,满足安装7.0 MW以下风机向8.0 MW以上海上风机安装、浅海向深海风电作业的能力。由于吊装平台桩腿长且为3根三角桁架式,桩靴面积大、结构稳定且起重能力强,适用大容量、深海海上风电机组的吊装,目前已实现海上风电机组塔筒吊装及翻身、机舱吊装、叶片吊装、叶轮吊装及翻身等作业,完成风机并网工作,并满足单叶片吊装、叶轮组合吊装等不同吊装方式。从钻井平台的实用性出发,在自升式钻井平台上完成6.8 MW及8.3 MW风机机组吊装及安装。

工程概况

基于广东阳江某项目,如图1所示,风场海域平均水深达到了42 m,场址离岸最近距离约55 km,为目前国内水域最深最远的海上风电场之一。该项目采用6.8 MW及8.3 MW的风机,以8.3 MW风机为例,轮毂中心高度115.53 m,叶片长度86.5 m,重量36 t,项目施工海域水下涌流较大,大风期较多,6—9月为台风季节,可作业窗口期较短,施工作业工效较低。且该海域常年风浪较大、长波暗涌

较多,对施工船舶性能要求较高,船型尺度较小的船舶无法在该海域作业,因此如何安全高效完成风机吊装工作成为项目需要解决的难题。



图1 项目概况

作业特点

基于3根三角桁架式桩腿自升式钻井平台,如图2所示,能满足大容量机组、50 m以下水深海上风电机组吊装需求。



图2 三角桁架式桩腿自升式钻井平台

在浪涌大的情况下，考虑到叶片长度长及重量重，单叶片吊具无法在运输船上直接吊装抓取叶片，综合考虑将叶片由运输船上转放置在自升式平台固定支撑装置上进行吊装，如图3所示。



图3 叶片转运至平台甲板上

在经常性浪涌大的情况下，无法在运输船上组装叶轮，将轮毂及叶片由运输船上转放置在自升式平台上，利用叶轮组合通用装置固定轮毂以完成三支叶片的组合安装，如图4所示。

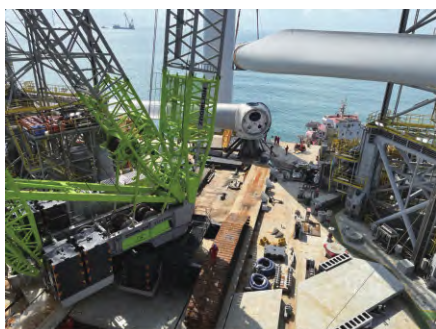


图4 利用叶轮组合装置组装叶片

自升式钻井平台上布置1 600 t履带起重机，如图5所示。



图5 平台上布置履带起重机

在吊臂杆无法满足360°旋转（实际1 600 t主起重机在平台船CJ46回转工作区域为60°，在平台船JU2000E回转工作区域为80°，吊装时与甲板上其他结构件无干涉）情况下，履带起重机在平台上布

置的行走轨道任意一个点上行走满足海上风电机组吊装作业要求，如图6所示。



图6 履带起重机在行走轨道上

在钻井平台的尾部固定安装三角悬台结构，即在平台尾部加装一个各种型号尺寸的T形钢、钢管及钢板组合而成三角桁架式的尾飘平台结构，与原甲板齐平，为叶轮组合吊装提供有利条件，增加叶轮组合吊装作业的设备材料堆放、组合吊装作业的使用面积，如图7所示。



图7 浮吊吊装尾飘平台

基于自升式钻井平台，在风速不大于13 m/s时能满足单叶片吊装作业，改变传统的风速不大于10 m/s的吊装作业要求，大大适应海上复杂多变的海况，增加了吊装作业的窗口期，提高了施工效率，如图8所示。



图8 单叶片吊装

利用立式塔筒工装完成塔筒运输及吊装作业，以增加运输和吊装效率，如图9所示。



图9 立式塔筒运输及吊装

吊装时在1 600 t履带起重机臂杆上安装缆风架，以增加履带起重机吊装过程的安全性，如图10所示。



图10 履带起重机臂杆缆风架安装三维示意图

安装平台开展吊装作业需要拖航就位，如图11所示。在考虑水文条件及气象条件情况下，采用抛锚绞移的方式进行就位。

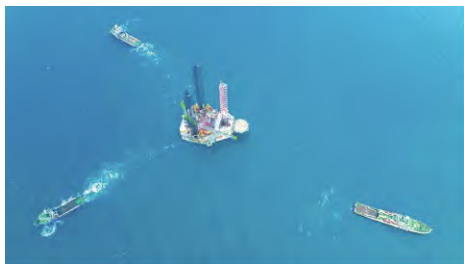


图11 钻井平台拖航

技术原理

采用转化后JU2000E (CJ46) 自升式钻井平台配合中联ZCC18000履带起重机进行海上风电项目施工，通过改变履带起重机的工况对塔筒、轮毂及叶片进行吊装和安装。风电机组采用分体吊装或叶轮组合吊装方式，即塔筒、机舱、轮毂及叶片，其中叶片采用单叶片吊装方式或轮毂叶片组合吊

装方式，依次通过运输船将设备运输到机位点后，使用JU2000E (CJ46) 自升式钻井平台配合中联ZCC18000履带起重机分步骤依次起吊安装。目前8.3 MW机型塔筒和机舱是最高最重部件，机舱总重约308 t (机舱重量为288 t，运输工装20 t)，塔筒总高度为87.03 m，轮毂中心到水平面的高度是115 m。所有主起重机站位，作业工况参照8.3 MW吊装方案。所使用主要机械设备有中联ZCC18000履带起重机、75 t平台甲板起重机和45 t平台甲板起重机。在吊装前，需要对履带起重机工况进行验证，如塔筒、机舱、轮毂、叶片及叶轮等根据履带起重机性能曲线进行吊装核算，履带起重机起升高度校核及安全距离校核，轮毂翻身高度计算，单叶片吊装高度分析计算，叶轮组合吊装溜尾验算等。

工序流程

单叶片吊装方式：现场准备工作（技术资料、设备材料、工器具等）→安全技术交底培训→吊装平台就位→设备运输船就位→塔筒吊装→主机吊装→轮毂卸货至吊装平台→拆卸工装→安装翻身吊具→主吊轮毂翻身→轮毂起吊就位→叶片安装前准备工作→第一支叶片安装→第二支叶片安装→第三支叶片安装→叶片防雷组件安装→验收。

叶轮组合吊装方式：现场准备工作（技术资料、设备材料、工器具等）→安全技术交底培训→吊装平台就位→设备运输船就位→塔筒吊装→主机吊装→轮毂卸货至吊装平台→拆卸工装→与叶轮组合通用装置固定连接→拆除叶片固定工装→叶片卸货至吊装平台→叶片安装前准备工作→第一支叶片与轮毂组装→第二支叶片与轮毂组装→第三支叶片与轮毂组装→轮毂前端出口框及盖板组件安装→叶轮吊装准备→叶轮与组合通用装置分离→叶轮吊装→叶轮与主机连接→防雷组件安装→工序验收。

从以上流程可知，两种吊装方式，在主机吊装前基本一样，在主机吊装后有较大区别，主要在叶片和轮毂的吊装方式上。

重要吊装工序

1. 塔筒吊装

海上风电在塔筒分体吊装施工中，中下段塔筒、中下段塔筒和上段塔筒由于不含电器柜，故

选择水平放置于驳船进行运输，到达机位点后，为满足水平运输塔筒的吊装要求，需主、副钩配合溜尾完成吊，使塔筒保持竖直状态。本项目风机安装平台主吊为单钩，无法独立完成塔筒翻身。因此项目采用了一种多功能塔筒翻身装置。在当前国内船机资源紧张形势下，使单钩主臂风机吊装平台得以进行风机吊装施工，具有明显的社会效益和经济效益。在运输船抛锚就位完成后，利用安装船上的起重机的风机桩基础与安装船之间搭设栈桥。

(1) 塔筒翻身工装

在塔筒卧式运输船就位并完成首段塔筒安装后，利用塔筒吊梁将需翻身塔筒吊装至平台甲板，下法兰端悬挂在风机安装平台艏部的翻身立柱，上法兰放置于设计工装。主起重机与上法兰吊具连接，如图12所示，依靠下法兰与立柱形成支点使主起重机能独立地完成塔筒的翻身，等塔筒完全竖立完后取下立柱吊具并拆卸下法兰吊座。施工工艺流程：施工准备→运输船靠泊→首段塔筒安装→卧式塔筒吊装至甲板→卧式翻身及安装，塔筒翻身装置如图13所示。



图12 塔筒上部法兰吊具安装



图13 塔筒辅助翻身装置

通过对单钩主吊风机安装平台塔筒翻身方案研究，该工装占用甲板面积少、造价低且实用性强。在当前国内船机资源紧张形势下，使单钩主臂风机吊装平台得以进行海上风机塔筒的吊装施工。同时，由于塔筒选择的是卧式运输，相比立式运输而言，对运输船载重量及吃水并无过多要求，一定程度上丰富了塔筒运输船的选择。在后续的装船运输过程中，由于整体重心低，使安全系数更高，具有明显的可操作性和适用性。

(2) 塔筒立式运输工装

目前海上运输大多采用卧式运输，具有安全可靠的优点，但在海上施工中施工窗口期短、塔筒翻身难等条件制约使得这种运输方式并不是非常

理想。为解决上述问题，研究一种用于海上风电项目塔筒海运的立式工装，包括底座工装、顶盖、钢丝绳及花篮螺丝。工装放置在运输船的特定位置，并使用焊机将工装焊在甲板上，工装固定完成之后将塔筒吊装到工装上。顶盖通过辅吊吊装到塔筒上端。钢丝绳在顶盖吊到塔筒上端之前先串在顶盖吊耳上（吊耳与顶盖通过电焊连接，4个吊耳均匀分布于顶盖的四个方位上），钢丝绳穿过锁扣，调整好长度后通过相应紧固装置锁紧。花篮螺丝一端与船体甲板焊接连接，如图14所示。



图14 塔筒立式运输工装

通过研究，该套工装承载强度大，与传统卧式工装相比，吊装塔筒过程时不需要翻身，在实际施工过程中可以节约大量时间，顶盖的设计使塔筒运输过程中抗风浪的能力大大加强，锁扣一端与船体焊接，一端保持活动连接，既起到抗风浪的作用，又保障了施工的便捷。

2. 单叶片吊装与叶轮组合吊装的对比分析

(1) 两种吊装方式共同点

1) 施工前准备工作。施工前技术资料及设备材料、工器具等均需准备到位，要进行安全技术交底，技术资料（如风机施工安装方案和各类工艺措施报告）要有相应的安全措施方案，起重机安全起吊能力、液压扳手及其力矩换算表、高强螺栓的摩擦系数等方面资料，已报监理及业主同意，施工作业准备均须满足方案要求，塔筒、主机等已经就位。

2) 安装平台就位。安装平台采用抛锚绞移的方式进行就位，需要拖航至距离风机基础横向间距150 m左右位置，抛锚艇靠安装船接其定位锚及锚漂后，进行定位锚抛锚作业，抛锚长度应满足施工要求。定位锚抛锚完成后收紧锚缆，通过绞缆控制船位缓慢靠近风机基础，直至尾部平台与风机基础中心约12 m。到达设计位置后，放下桩腿，压桩并

顶升平台至方案设定的气隙高度。

3) 运输船就位。运输船航行至距安装船船舷约50 m, 锚艇辅助运输船抛锚, 抛锚长度不少于500 m, 绞移至指定位置之后收紧固定船位。为防止运输驳在靠泊过程碰撞安装船, 运输驳应与安装船保持5 m左右的距离。轮毂、叶片在运输船上满足吊运要求。

(2) 两种吊装方式不同点

1) 轮毂吊装方式不同。单叶片吊装方式, 轮毂需要进行翻身单独吊装。在轮毂吊装前检查设备外观, 检查所采用的工器具及材料是否齐全符合使用要求。此时吊装流程为: 轮毂卸货至吊装平台→拆卸工装→安装翻身吊具→主起重机轮毂翻身→起吊就位, 如图15所示; 履带起重机在位置1卸轮毂, 后退12 m至位置2进行轮毂翻身, 翻身完成后行至位置1进行就位安装; 此时履带起重机超起工况为: 250 t配重, 48 m半径, 超起半径27 m。轮毂翻身比较重要的点为轮毂主吊具的安装, 先进行主吊具的翻身, 然后利用辅助起重机完成主吊具的安装。需要注意的是在安装主吊具的轮毂变桨轴承法兰面的3点钟、9点钟方向安装辅助揽风绳。然后主起重机与立柱配合将轮毂翻转82°至与主机的对接状态。系好风绳, 起吊轮毂, 同时引导绳操作人员控制轮毂方向, 使其不因风向改变而出现晃动。起吊轮毂至主机高度后按相关要求完成组装。



图15 轮毂翻身

叶轮组合吊装方式, 轮毂吊运至平台甲板完成后续叶片组合工作。先用主起重机转运运输驳船上的轮毂至吊装平台, 后拆卸运输工装, 用螺栓将轮毂连接在吊装平台甲板的轮毂支架转接盘上, 使轮毂固定。轮毂支架按照要求进行加高加固, 避免叶片和甲板上设备相互影响。

2) 叶片与轮毂组合方式不同。单叶片吊装方

式, 叶片与轮毂空中依次组合。单叶片首支安装, 叶轮系统处于正“Y”字形, 并锁好风轮锁。单叶片安装位置角度定义: 与塔筒垂直的水平位置定义为0°位置, 由0°位置逆时针向上位置定义为正角度位置, 由0°位置顺时针向下位置定义为负角度位置。此时主起重机工况: 主臂114 m、最大作用半径52 m (起重能力177 t)、超起配重250 t、超起最大作业半径27 m。为满足单叶片吊装的叶片运输、放置要求, 需要86.5 m叶片以下放置姿态, 如图16所示。

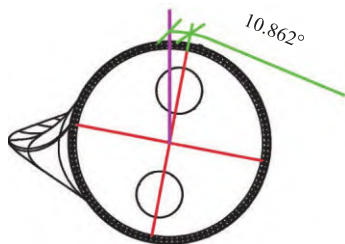


图16 86.5 m叶片的存放

第一支叶片安装, 叶轮处于正“Y”字, 安装角度为+30°。操纵起重机、缆风系统和吊具系统, 使叶片运动到安装位置附近。如图17所示。安装叶片吊具时, 先在叶尖侧布置缆风绳, 防止吊装过程中出现巨大摆动及旋转。

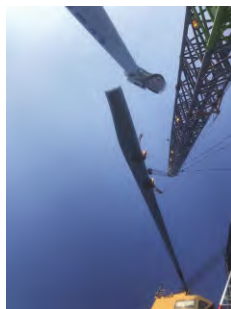


图17 第一支叶片对接安装

叶片安装好后, 通过起重机盘车第一支叶片至-60°, 用液压锁定销锁住轮毂, 并且确保液压锁定销锁住轮毂, 然后安装液压锁定销的机械止退杆。

第二支叶片安装采用水平安装, 即3点方向叶片安装。吊装第二支叶片前, 机舱逆时针偏航180°, 主机舱尾部正对平台船船舷 (找到合适叶片安装位置), 其余安装整个流程与第一支叶片安装一致。项目试验了水平单叶片吊装方式, 如图18所示。



图18 3点钟方向安装叶片示意图

第三支叶片安装采用 $+30^{\circ}$ 叶片安装。吊装第三支叶片前，叶轮盘车至正“Y”形并锁好叶轮锁紧销，逆时针机舱偏航 110° ，主机舱头部与平台船舶舷成 15° 夹角（找到合适叶片安装位置）；其余安装整个流程与第一支叶片安装一致，如图19所示。

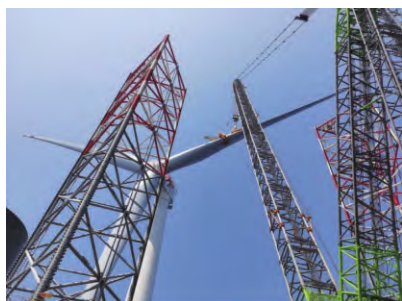


图19 第三支叶片安装

叶轮组合吊装方式，叶片与轮毂先行组合后吊装。叶轮组合吊装方式需要在平台上固定设置一个叶轮组合装置，用以固定轮毂和组合叶片，如图20所示。



图20 叶轮组合装置

叶片采用单钩+吊梁起吊方式，主吊挂吊梁，吊梁两端使用两根扁平吊带分别绑定叶根和叶中工装处。待叶片接近轮毂系统时，对好叶片与变桨轴承内圈的位置以保证基本同心，继续将叶片靠近轮毂系统对接，依次完成三支叶片的组装，如图21所示。



图21 第二支叶片与轮毂组装完成

叶轮组装完成之后，将叶轮与平台叶轮组合装置连接螺栓拆卸完成后开始起吊叶轮，起吊叶轮系统至主机高度后按相关要求完成主机与叶轮的组装。

结束语

项目利用转化的石油钻井平台作为风机设备吊装平台，采用海上风机分体安装方式，完成项目整体履约。塔筒运输和吊装采用专用海工运输工装，利用单钩主吊结合塔筒翻身装置完成塔筒吊。针对不同的叶片吊装方式，有不同的施工重点和难点。其中单叶片吊装方式：在机舱吊装完成后，平台船由原来的气隙高度23.5 m升至45 m，在浪涌大的情况下，将86.5 m叶片及工装及由运输船上转至自升式平台吊装船上，通过调整轮毂叶片相对位置安装角度完成3支叶片的分体吊装，并与轮毂组装完成；叶轮组合吊装方式：通过主吊转运运输驳船上的轮毂至吊装平台，利用工装使轮毂固定，叶片采用单钩+吊梁起吊方式，安装缆风溜绳辅助控制叶片的转向，依次安装3支叶片，完成辅助工作之后，开始起吊叶轮，起吊叶轮系统至主机高度后，完成后续组装工作。钻井平台的运用对我公司完成项目施工任务有巨大的推动作用，在取得成果的同时也获得了宝贵的施工经验，保证了项目施工质量、安全性和经济性能指标的实现。EA

（收稿日期：2022-05-29）

参考文献

- [1] 陈杰湛. 浅谈深水区海上风电机组安装技术与发展[J]. 智能建筑与工程机械, 2021, 3(12): 55-58, 107.
- [2] 朱璟桢. 基于自升式平台的某海上风电场风机安装施工方案[J]. 中国水运, 2022(4): 95-97.
- [3] 李美娇. 海上风力发电机组分体安装技术分析[J]. 机电信息, 2021(19): 57-59.