

# 海上风电超长叶片组拼技术节能效果分析

高昊然, 李亚军

(中交第一航务工程局有限公司总承包工程分公司)

**摘要:** 为了提高海上风电项目风机安装平台船的适用能力,降低船舶准入门槛,缩短风机叶轮组拼时间,依托广东粤电湛江外罗海上风电项目,研究并应用了超长叶片组拼技术,该技术依靠360°轮毂旋转工装及超长叶片组拼吊梁等措施,通过在实际施工过程中对吊装工艺的不断改进,提升了风机安装平台船的适用性。此项技术适宜在海上风电风机安装类项目上应用,能够有效地减少施工时间、提高施工效率、降低燃油消耗、提前并网发电以利用清洁能源,从多个方面达到了节能的目标。

**关键词:** 海上风电; 节能; 超长叶片组拼技术; 风机安装; 安装平台船

## 0 引言

随着海上风机大型化的发展,风机叶片长度及重量不断增大,国内部分现有风机安装船因其自身尺寸较小,吊机起重量不足,吊装作业半径不符合要求而无法进行风电机组的安装,采用传统工艺施工耗时较长且很难满足海上连续作业时间窗口,且随着海上风电降本压力的不断增加,开发新型海上风电机组吊装技术成为海上风电技术发展的迫切需求<sup>[1]</sup>。广东粤电湛江外罗海上风电项目通过创新工艺方案降低传统工艺所需船舶性能,为海上风电工程施工技术领域提供了新技术新工艺。

## 1 工程概况

广东粤电湛江外罗海上风电项目装机容量198 MW,场址位于湛江市徐闻县,共布置36台叶片长度76.6 m,重量38 t,叶轮直径为155 m,轮毂高度100 m的明阳5.5 MW风机,施工内容包括36套风电机组塔筒、轮毂、机舱和叶片等设备部件的组拼及安装施工。

## 2 工艺原理

### 2.1 技术路线

结合海上风机安装工程,收集传统叶轮组拼吊装的各项数据资料;分析风机安装过程影响风机安装时间的最主要因素并提出相应改进措施;采用BIM建模模拟分析风机安装工程关键路径,找寻技术创新最佳切入点;针对海上风电安装平台船体空间开阔但大跨度安装叶片耗时长的问题,设计轮毂可旋转工装,保证所安装叶片一直处于最佳安装位置不变;针对海上风电安装平台船体

空间及设备能力受限无法双机抬吊进行叶片组拼的工艺要求,设计可单机双点吊装的组拼吊梁,打破风机安装船的吊装性能限制;利用有限元软件对结构及部件进行分析,确保结构在组合工况下受力稳定;根据理论分析和强度校核,提出合理的海上风电安装平台超长叶片组拼关键技术。

### 2.2 主要技术特点

1) 轮毂旋转工装可旋转360°,用于快速便捷完成海上风机叶轮组拼;

2) 超长叶片组拼吊梁可以自动调节叶片抬升角度并自动脱钩;

3) 对原有的吊装工艺进行改进,通过多功能360°轮毂旋转工装及智能化超长叶片组拼吊梁等技术完成超长叶片整体式叶轮组拼及吊装。

### 2.3 超长叶片组拼吊梁

超长叶片组拼吊梁主要由主体桁架梁、叶根角度调节装置、叶中自动脱钩装置以及电气控制系统4部分组成<sup>[2]</sup>,适于叶轮吊装工艺中超长叶片组拼时风电安装平台船双机抬吊作业半径不够或起重能力不足的单起重机海上风电安装平台。其施工顺序为:按照预定吊点位置进行叶片吊具安装,在吊梁与叶片吊点对应位置设置吊具悬挂点,并在吊梁上布置缆风控制系统,然后起吊叶片至一定高度,通过缆风控制系统进行叶片高空转向,起吊叶片至轮毂对接位置,设备自动调整叶根角度并使叶片与轮毂顺利对接,叶片对接完成直至达到拆钩条件后,叶根吊带通过电动吊机进行拆除,叶中吊带通过叶中自动解扣装置完成自动脱钩,移动吊梁起吊下一叶片。

使用吊梁后,可在现有的船机设备基础上使用单台吊车进行超长叶片组拼,可不受因船舶自身性能无法进行双机抬吊的制约,且在安装过程中能够有效地节约叶轮组拼作业时间。

#### 2.4 多功能 360°轮毂旋转工装

传统的轮毂工装大部分为固定式,在叶轮组拼作业时对船舶的操作空间、操作时间以及吊车的性能要求极高,且操作费时费力。多功能 360°轮毂旋转工装在叶轮组拼时无需大跨度安装叶片、作业半径小,安装难度及安装时间大幅度降低,有效地减少了叶轮组拼时间,解决了双机抬吊复杂多路径吊装的难题。

主吊起吊轮毂过驳至多功能 360°轮毂旋转工装上,控制溜尾叶片所对接轮毂法兰面中心线与风机安装船前缘保持 7°夹角,并用 52 颗高强螺栓将其固定;起吊叶片,主吊和辅吊吊具分别与叶根、叶中部位连接,且叶根吊带绕叶根圆周一圈,距离叶根 1.3 m,叶中吊带在叶中(46±1.5) m 范围内绑定;待叶片吊具悬挂完成,主吊、辅吊同时起吊至轮毂对接法兰面位置,直至叶片安装的螺栓距变桨轴承 10 mm 左右,通过操作变桨操作箱使变桨轴承内圈零位孔与叶片前缘零位标识对齐,同时主吊、辅吊配合对接动作,完成第 1 支叶片对接;待第 1 支叶片安装完成并已拆钩,启动电气系统驱动轮毂轴承旋转,使第 1 支叶片随之旋转,以回转角度计量仪确定旋转 120°后停止,确保第 2 支叶片对接法兰面处于第 1 支叶片对接法兰面位置处;重复以上步骤安装第 2 支叶片并进行旋转,直到完成全部叶轮的组拼<sup>[2]</sup>。

将轮毂工装做成旋转式,组拼作业期间叶片一直处在风机安装船与运输船之间最优的位置,不需要大跨度安装叶片,吊机的吊装半径较小,规避吊装安全风险,如图 1 所示。



图 1 轮毂旋转工装应用

抽取本项目 28 号、19 号、27 号 3 个机位使用多功能 360°轮毂旋转工装进行风机安装的工效统计。经现场实际数据分析,采用多功能 360°轮毂旋转工装平均每个机位节省 10 h 有效作业时间,叶轮组拼效率提升 42%,极大地缩短了施工工期,工效对比如图 2 所示。

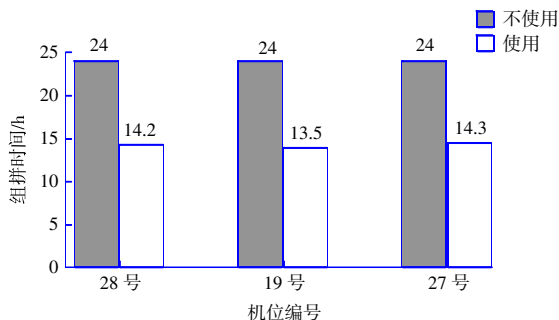


图 2 不使用及使用轮毂工装组拼工效对比

### 3 效益分析

#### 3.1 节能环保效益

因本项目使用“华电稳强”号和“顺一 1600”号 2 艘风机安装船同时施工,故节能减排量按照 2 艘安装船分别计算。

##### 1) “华电稳强”号

##### ①项目实施前能耗量

风机安装平台在叶轮组拼过程中,需要船舶主发电机为 2 台吊机(本船配备 2 台吊机)供电以确保吊车正常运转,在吊车使用期间,若发动机额定耗油率按 200 g/kW·h 考虑,主发电机(功率为 1 097 kW)小时额定油耗为 219.4 kg。

在采用新技术前,每台风机统计叶轮平均组拼时间约为 24 h,每台风机组拼叶轮时吊车运转的柴油消耗共计:  $24 \times 219.4 = 5\,265.6 \text{ kg} \approx 5.27 \text{ t}$ 。

##### ②项目实施后能耗量

通过新技术进行施工后,叶轮组拼时间平均约为 14 h,柴油消耗共计:  $14 \times 219.4 = 3\,071.6 \text{ kg} \approx 3.07 \text{ t}$ 。

##### ③项目节能量

由“华电稳强”负责的 26 台风机的叶轮拼装方面节省柴油量为:  $(5.27 - 3.07) \times 26 = 57.2 \text{ t}$ 。

##### 2) “顺一 1600”号

##### ①项目实施前能耗量

以风机安装平台船“顺一 1600”来计算(本船配备 1 台吊机),在叶轮组拼过程中,需要 1 台 260 t 履带吊配合船舶主吊进行双机抬吊来完成叶轮的组拼,按 2018 年版公路工程机械台班费用定

额考虑,260 t履带吊每台班耗油 176.42 kg,主吊车在使用时由船上主发电机开启供电(主发电机功率为 1 097 kW),主发电机小时油耗为 230.37 kg。

现场叶轮组拼时间统计平均约为 24 h,在原有施工技术条件下计算每台风机的柴油消耗,260 t履带吊:  $24 \times 176.42 / 8 = 529.26 \text{ kg} \approx 0.53 \text{ t}$ ;船上主吊机:  $24 \times 230.37 = 5\,528.88 \text{ kg} \approx 5.53 \text{ t}$ ,柴油消耗共计  $0.53 + 5.53 = 6.06 \text{ t}$ 。

### ②项目实施后能耗量

采用新技术进行施工后,可在不使用履带吊的基础上完成叶轮组拼,无能源消耗,主吊车使用时间由 24 h 减少至 14 h,即:  $14 \times 230.37 = 3\,225.18 \text{ kg} \approx 3.23 \text{ t}$ 。

### ③项目节能量

项目在 3 台风机的叶轮拼装方面节省柴油量为:  $(6.06 - 3.23) \times 3 = 8.43 \text{ t}$ 。

### 3) 新技术衍生的节能量

风力发电替代火力发电能够有效降低系统发电成本和实现节能减排(减少煤炭等化石能源消耗、降低火力发电产生的温室气体和污染物排放)<sup>[9]</sup>,通过海上风电安装平台超长叶片组拼关键技术的研发与应用,每台风机安装可节省 10 h 有效作业时间,不仅有效地降低了船舶及人员的成本费用,更能够提前完成风机安装以便提前完工并网发电。通过对广东省湛江市外罗风电场特征计算,明阳 5.5 MW 风机(36 台风机)理论年发电量为 796.727 GW·h,净发电量为 723.508 GW·h,平均尾流损失 9.19%。除去尾流损失和空气密度折算外,综合损失折减系数取值 67%,计算年上网电量结果为 484.751 GW·h,满发小时数为 2 382 h,容量系数达 27.19%。以此计算明阳 5.5 MW 风机年度每小时平均发电量约为 1 495.59 kW·h。在采用新技术后,后续安装的 29 台风机每台风机可节约 10 h 的施工时间,风机能够提前并网发电,对此可获得 10 h 的发电量约为:  $10 \times 29 \times 1\,495.59 = 433\,721.1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,折合标准煤:  $433\,721.1 \times 0.122\,9 = 53\,304.32 \text{ kg} \approx 53.3 \text{ t}$ (标煤),折合柴油消耗为  $53.3 / 1.457\,1 = 36.58 \text{ t}$ 。

### 4) 新技术下的节能量

经以上计算,在采用新技术进行风机安装施

工后,可有效节约柴油  $57.2 + 8.43 + 36.58 = 102.21 \text{ t}$ ,折合标准煤为:  $102.21 \times 1.457\,1 = 148.93 \text{ t}$ ,因此,项目总节能量为 148.93 t 标煤。

柴油折标煤系数取值为 1.457 1 t 标准煤/t 柴油,电力折标煤系数取值为 0.122 9 kg 标准煤/kW·h 电力(根据 GB/T 2589—2020《综合能耗计算通则》计算所得)。

### 3.2 经济效益

在湛江外罗海上风电项目中,超长叶片吊装技术前期总投入 142.418 3 万元,在项目实施过程中,仅油耗一项就节省柴油 65.63 t,同时因提前完成并网发电,在新能源置换传统能源的利用上节约了 53.3 t 标煤,折合约 36.58 t 燃油,按照当时 7 000 元/t 价格计算能节省燃油费用约 71.547 万元。新技术的应用能够减少每台风机约 10 h 吊装有效作业时间,船舶及人员费用按照 45 万/d 的成本计算,可节约成本约 543.75 万元,更是大幅降低了防台及大风期所经历的施工风险及费用,保证了施工人员的生命财产安全。采用新技术后提前完成了风机安装,使风场提前完工并可发电,节省了工程投资,也增加了本工程带来的直接经济效益。

## 4 结语

当前我国海上风电正在向深远海、规模化的阶段发展,机组大型化趋势明显,整合施工工艺,降低施工成本是当下海上风电施工所追寻的目标。通过采用海上风电安装平台超长叶片组拼技术,进一步完善了风电机组的吊装形式,顺应了海上大兆瓦机组的发展趋势,降低了施工所需的设备能力要求,减少因大兆瓦风机升级换代而导致的对海上风电安装平台进行的重复投资,从根本上解决了超长叶片吊装工序的繁琐性,极大地提高了施工效率,也从施工工艺革新方面切实有效地降低了能耗。

### 参考文献:

- [1] 李红峰,沈星星,张竹,等.大型海上风电机组水平单叶式吊装技术分析[J].风能,2020(3):76-79.
- [2] 奚乾蛟,韩益,董孟永,等.海上风电安装平台超长叶片组拼技术研究与应用[J].能源与环境,2019(6):106-107.
- [3] 黄莹灿,李梦,王燕楠,等.风电节能减排环境经济效益分析[J].中国市场,2014(24):135-139,174.