

# 5.5MW 机械拼装式风机叶片吊装

## Hofting of 5.5MW Mechanical Assembled Fan Blades

屈楠楠 张会忠 陆晨 詹君萌 王毅丞

Nannan Qu Huizhong Zhang Chen Lu Junmeng Zhan Yicheng Wang

中国电建华东勘测设计研究院 中国·浙江 杭州 310011

Power China East China Survey and Design Institute, Hangzhou, Zhejiang, 310011, China

**摘要:** 越南国荣风电场采用的是越南现存的 General Energy 厂商生产的单机容量最大的风机机组, 该风机的叶片采用的是两段式机械拼装式叶片。叶片分为 ROOT 和 TIP 两个部分, 通过机械拼装方式完成叶片预组装, 其吊装工艺相对常规叶片吊装更加复杂, 同时叶片的吊装难度也因其本身的长度的增加而增加。

**Abstract:** The QUOC VINH Soc Trang Wind Power Plant adopts the largest single-capacity Wind turbine units produced by the existing General Energy manufacturer in Vietnam. The wind turbine blade adopts a two-section mechanically assembled blade. The blade is divided into two parts: ROOT and TIP, complete blade assembly installation by mechanical work, its erection process is more complicated than conventional blade, at the same time, the difficulty of blade erection also increased due to its own length.

**关键词:** 单机容量最大; 两段式; 机械拼装; 叶片吊装

**Keywords:** single machine capacity; two-segment type; mechanical assembly; blade lifting

**DOI:** 10.12346/peti.v3i4.6445

### 1 引言

越南国荣 30MW 风电总承包项目位于越南南部朔庄省永州市, 建于 2020 年至 2021 年, 于 2021 年 10 月 30 日全容量并网发电并投入使用, 风电场共计包含 6 台 General Energy (以下简称 GE) 5.5MW 的陆上临海风力发电机组, 是当时越南风电市场上单机装机容量最大的风力发电机组。

该风机含 6 节塔筒, 机舱、传动装置 (Drivetrain)、轮毂 (HUB)、叶片等主要部件, 高度为 120.9m。风机叶片共计由三只两节式机械拼装叶片预装组而成, 其旋转直径为 158 米。采用强度较高、抗腐蚀、耐疲劳的复合材料作为叶片制造的原材料, 其外壳采用的原料是玻璃纤维环氧树脂, 叶尖采用强度更高的碳纤维材料, 为了降低噪声, 叶片尾部压力侧设置了低噪声后缘, 形状为锯齿状, 如图 1 所示。

GE 作为国际知名的风机设备供货厂商, 其风力发电机组的技术相对成熟, 其风力发电机组是国际市场上认可度较高的产品。越南国荣风力发电场项目采用的是目前越南市场上单机容量最大的风力发电机组, 也是 2021 年为数不多可

以全容量并网发电并享受到工贸部公布的优惠电价的项目之一。该机组叶片的吊装主要分为叶片的预组装、工作准备和叶片吊装三个部分<sup>[1]</sup>。



图 1 风机叶片全览

【作者简介】屈楠楠 (1994-), 男, 中国江苏盐城人, 本科, 助理工程师, 从事新能源、水电等电力研究。

## 2 叶片预组装

### 2.1 叶片运输进场

由于叶片长度过长，两段叶片分别约为(ROOT)60.9m和(TIP)18m，60.9m的叶片长度对于设备运输的压力是十分巨大的，需要充分考虑拼装车辆的长度、道路的转弯时半径、以及运输过程中的警示、跟车以及磕碰预防等事宜。在道路转弯半径满足条件的前提下，一般考虑午夜越南境内公路上车辆较少的情况下进行叶片运输工作。

叶片运输时采用的是相对较矮的运输支架，这样有利于保证叶片重心下移，使得运输过程整个叶片更加稳固和安全，有利于保证叶片能够成功无损地抵达风场。

### 2.2 预装支架更换

由于原始的运输支架偏矮且拼接完成后叶片的尾部由于重力作用将直接下垂至地面，很容易对叶片造成损伤，因此要在其预组装之前更换预装叶片的专用支架以提高叶片的离地高度<sup>[2]</sup>。

风场内叶片的布置，通常三只叶片布置于风场同侧，三只叶片彼此间隔约4~5m。更换叶片的预装支架时，需要提前安置好叶片支架，用两台辅助吊机将叶片根部(ROOT)抬至新的支架上并加以固定。同时需要保证预组装叶片的工作平台有一定的相对高度且平台保持平整，这样有利于叶片的机械拼装以及后续对叶片间隙进行封边等操作。

### 2.3 叶片预组装

利用叶片夹具固定叶片尾部(TIP)部分，辅助吊机吊起叶片夹具，利用手拉葫芦调整尾部的水平度，平稳地插入叶片根部的机械连接处，确保叶片的两个部分能够良好地进行机械连接，安装好舷销锁，连接叶片内部的防雷电缆，检测连接处的电阻值，保证防雷电缆的接头处电阻值小于 $10 \times 10^{-6} \Omega$ ，以便叶片在雷雨天气可以更好的达到防雷的效果。在进行叶片吊装前需要用封边胶带对叶片的连接处的间隙进行封边处理，保持机械连接处的具有良好的密封性。

## 3 工作准备

在叶片吊装之前，除了确保叶片的预组装完成以外，还需要保证其他部分的工作准备就绪。

### 3.1 工具准备

800T主吊、75T辅助吊机需要准备专用的GE叶片吊装工具Single Blade Installation以下简称SBI(SBI配备吊梁及组件、发电机、液压装置、遥控装置、备用电源接线等)、机舱偏航(Yaw)遥控器、轮毂盘车装置、柴油发电机、缆风绳、夜间工作照明灯等。

### 3.2 调试准备

机舱上需要安装好轮毂盘车装置的压力油管以便对轮毂进行盘车至吊装平面(三点钟或九点钟，取决于现场实际方向)，确保吊装平面与地面方向保持垂直，插好锁定插销、锁紧机械刹车、液压刹车；连接好柴油发电机，将机舱偏航

至相应位置；提前调试好轮毂的变桨装置，便于后续叶片吊装螺栓对孔。

### 3.3 自然条件

叶片吊装的自然条件受风速的影响较大，一般无风条件下进行叶片的吊装是最好的，此时的安全系数最高，正常情况下离地120m的高空是肯定存在自然风的，一般平均风速保持在6m/s以内即适合叶片的吊装。

### 3.4 其他

吊装前，叶片的根部连接螺栓预装需要超过4小时以上，确保叶片螺栓末端凝固剂完全凝固，才能符合吊装要求；在叶片尾部螺栓处和轮毂的每一个吊装平面的零位做好标记以便吊装时确定螺栓能够准确对孔<sup>[3]</sup>。

## 4 叶片吊装

中国及其他国家的风机叶片有两种吊装方式，主要分为地面组装三只叶片后连同轮毂一起进行吊装和单只叶片拆分成三次分开进行吊装两种方式。

根据现场场地大小、环境、吊装工具等限制因素，GE风机叶片的吊装考虑到叶片长度与常规叶片相比长度较长，即便三只叶片能够在地面完成组装，也无法使得800T主吊有效吊装半径达到要求，且GE方提供的专用吊装工具SBI属于单只叶片吊装工具，无法满足吊具方面的要求。因此，结合现场实际情况后，GE5.5MW风机叶片的吊装工序必须拆分为三次进行叶片吊装。

### 4.1 叶片起吊

叶片在吊装之前，需要将叶片预装支架的内侧进行垫高约20cm，便于叶片专用吊具(SBI)更加容易固定在叶片的中部吊点附近，需要保持叶片与液压夹具之间无缝隙且相对紧实，如图2所示。



图2 SBI夹具固定

一般一只叶片需要接入四根缆风绳,便于在吊装过程中叶片保持平衡,同时轮毂内的指挥员也可以通过缆风绳的发力点的指挥控制叶片的偏移方向。叶片起吊时应当缓慢提升叶片至轮毂附近高度,离地约120m。通过主吊进行横向偏移等操作完成叶片的根部抵达轮毂附近,再由指挥员指挥缆风绳的发力点以及控制轮毂的变桨装置相互配合,确保叶片尾部的114颗螺栓全部准确插入轮毂的螺栓孔中。

插入叶片螺栓时,需要确保叶片与轮毂上的标记螺栓孔能够重合,一般的标记点处于叶片零位。如图3所示,叶片处B点左侧标记的第一个螺栓必须与轮毂标记零位(D点)右侧的第一个孔(C点)进行匹配。

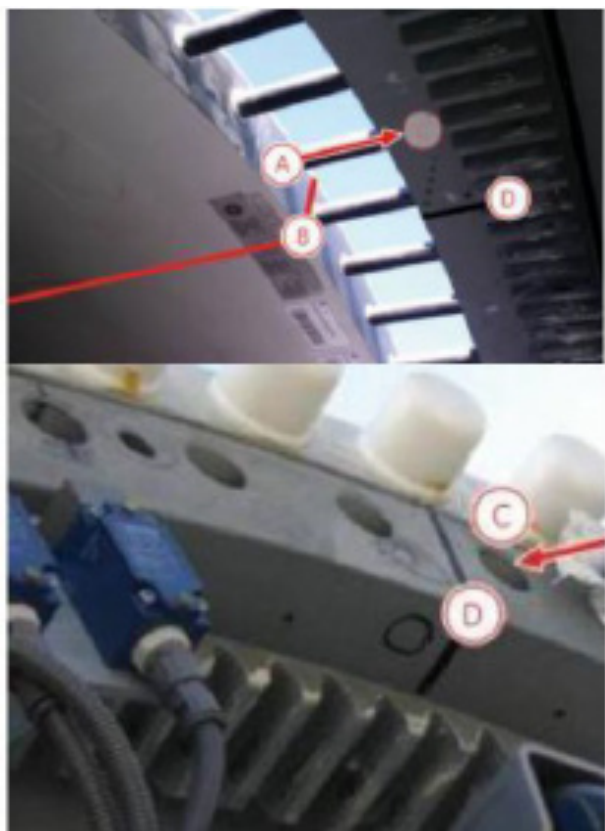


图3 螺栓孔对接

完成后将SBI的备用电源接线移至机舱内,防止SBI工具在吊装期间出现发电机熄火的情况。轮毂内施工员安装上垫片和螺母,叶片与轮毂接触面外露部分的螺栓数量约为32颗,上下对称分布各有螺栓16颗,需要完全将这32颗螺栓安装完成后用快速力矩扳手拧紧达到相应要求的力矩值(1000NM)。使用快速力矩扳手的原因是有效缩短打力矩所需的时间,有利于为下一步摘除SBI工具争取时间,提高吊装的安全系数。

#### 4.2 移除SBI吊具

在移除SBI吊具前,施工员需要清除留在轮毂内的所有工具、杂物,关闭轮毂的进口,通过控制SBI遥控器移除吊具。控制SBI吊具上的液压装置,缓慢收紧液压杆,一般情况

下这一步不会太顺利,因为此时很有可能是一端的SBI液压夹板装置已经脱离叶片,另外一侧的SBI装置卡在叶片内侧,从而导致SBI吊具无法正常摘钩,此时需要用缆风绳进行纠偏,保证前后两侧的液压杆能够完全脱离叶片后,才能横向偏移主吊,移除机舱内的SBI备用电源线,完成SBI吊具的摘除<sup>[4]</sup>。

成功摘除SBI工具后,松开机舱内的刹车,利用轮毂盘车装置缓慢顺时针旋转叶片直至插销松动后拔出轮毂内的锁定插销。再将轮毂顺时针旋转90°左右,保证第一只叶片调整到竖直方向(6点钟方向),固定好手动刹车和发电机侧的液压刹车,便于施工员从检修口进入轮毂内部利用轮毂变桨装置旋转叶片角度,完成剩余的82颗螺栓和垫片安装工作,利用快速扳手先完成1000NM的力矩值后再用力矩扳手拧紧全部的叶片螺栓(114颗)达到力矩值2450NM。

#### 4.3 剩余安装工作

因为两只叶片吊装完成后会导致轮毂及机舱受力不平衡,因此第二只叶片与第三只叶片的吊装间隔不能超过太长时间。由于完成单只叶片的螺栓力矩需要很长的时间,排除工具过热损坏等不利因素,一般完成单只叶片力矩需要至少10小时以上。考虑到越南临海地区气候多变的因素,所以往往是第一只叶片单独吊装,第二只叶片吊装的同时准备第三只叶片吊装。

按照前述方法完成第二只叶片的吊装,当完成初始的32颗叶片螺栓的力矩值1000NM后,需要进行SBI吊具的摘除工作,为第三只叶片的吊装准备创造条件。第三只叶片吊装前首先需要先移除轮毂踏板(HUB STAND),该工具是在轮毂吊装前拼装好后固定在轮毂底部的,其作用是封住轮毂的底部空隙,保证吊第一只叶片时施工员在轮毂内有立足之地,将轮毂逆时针盘车210°左右,保证轮毂检修窗口处正对机舱,施工员从检修门进入轮毂移除固定轮毂踏板的连接螺栓,拆除相关的固定装置,再从轮毂检修口移出拆卸的轮毂踏板的部件。

移除轮毂踏板的同时,需要提前将SBI吊装工具与第三只叶片固定好,等待轮毂盘车至第三只叶片吊装位置,按照前述方法完成第三只叶片的吊装。移除SBI工具后,逆时针盘车90°,保证第三只叶片竖直朝下(6点钟方向),固定好手动刹车和发电机侧的液压刹车后方可利用变桨遥控器转动叶片角度完成第三只叶片的螺栓力矩值,完成后重复前述操作保证第二只叶片的方向竖直朝下,完成第二只叶片的螺栓力矩值。

此外,因为打剩余两只叶片力矩时,机舱内的机械刹车和液压刹车是完全刹死的,所以,会有相当长的一段时间内机舱内的刹车是完全锁死的。长时间锁死刹车会使得机舱连同轮毂和叶片共振产生剧烈晃动,严重时会使整个塔筒发生晃动,晃动距离水平位移可达2~3m,出现这种情况时,



施工员需要立即移除轮毂内的工具等杂物,关上检修门,松开刹车,待晃动停止后再次进入轮毂内部进行施工。因此剩余两只叶片要尽可能在24h内完成叶片螺栓的力矩值,避免此类安全隐患的产生。

## 5 结语

GE是全球领先的数字工业公司,其涉猎领域广泛,在风力发电领域深耕多年,机组性能相对成熟,有着广阔的海外市场知名度。其新推出的5.5MW型号的风力发电机组也是在原有的机型上有所创新,其叶片长度远超常规风力发电机组,叶片的机械拼装也是采用了创新型的工艺技术,达到

了绿色能源发展史上的又一个新高度。

## 参考文献

- [1] 邬明材,张元海,李沐林.超高风机吊装与狭窄吊装平台设计[J].广东水利水电,2020(6):5.
- [2] 王正训.风机吊装施工工艺[J].工程技术(文摘版)建筑,2017(1):176-178.
- [3] 付洪.风机吊装安全技术分析[J].百科论坛电子杂志,2020(11):1596.
- [4] 赵彦飞,袁冬冬,牛虎,等.5.0MW大型风机吊装施工技术[C]//2018智能电网新技术发展与应用研讨会,2018.