

起重船浮态安装深远海大兆瓦风机工艺与导向装置研究

张有坤

(中交第一航务工程局有限公司总承包工程分公司)

摘要: 基于长乐外海海上风电场 C 区工程项目系统, 总结和研究了水深约 40 m 深远海海域起重船浮态安装大兆瓦风机的适用性、关键工艺及新型导向装置。通过对“冠盛一航”起重船的吊重能力、吊高能力与作业回转半径进行综合分析, 确定了 10 MW 风机各组件起吊的技术参数和作业边界; 针对船舶驻位稳定性, 采用顶流驻位、对称锚泊等措施提高作业精度; 针对机舱组合体对接难题, 开发了内插式导向装置, 解决了浮态条件下机舱精确导向定位问题。实践证明, 在风速 <10 m/s, 浪高 <1 m, 涌浪高度 <0.5 m 的适宜海况下, 起重船浮态安装工艺可靠, 较自升式安装船安装效率高。研究成果拓展了起重船在深远海风电建设中的应用场景, 为国内深远海风电建设提供了技术支持和经验借鉴。

关键词: 深水浮态安装风机; 起重吊装; 机舱导向装置; 工效分析

0 引言

随着全球能源结构向清洁低碳方向加速转型, 海上风电作为一种高效、可再生且资源潜力丰富的能源形式, 在近 20 a 内实现了跨越式发展。海上风电场单机容量不断增大, 场址逐步向深远海延伸, 对施工技术和装备能力提出了更高要求。风电安装船作为海上风电施工环节的关键装备, 其作业性能直接影响到风电场建设的安全性、效率及经济性。海上风电场建设高度依赖于专业化施工装备, 目前主要采用自航自升式风电安装船、坐底式风电安装船及大型起重船等 3 类主要作业平台。

针对近海浅水区域, 国内外已经积累了大量成熟的自升式安装船施工经验^[1]。随着水深的加大以及海上风电项目向深远海发展, 受限于桩腿长度、结构稳定性及作业成本, 自升式安装船的适用性和经济性出现下降。为适应深远海风电建设需求, 近年来部分项目开始探索大型起重船进行风机浮态安装作业。已有的工程实践, 主要集中在 10~20 m 浅水区, 相关吊装技术路径较为成熟^[2]。然而, 在水深约 40 m 及以上中深水区域, 受环境荷载、锚泊控制与船体姿态稳定性影响, 浮态安装面临更为严峻的技术挑战, 缺乏系统性的作业标准和大样本实证数据, 特别是针对大型风机机

舱在浮态环境下的精确吊装与导向对接, 当前研究相对薄弱, 仍以工程试验和经验总结为主, 亟需理论与技术的进一步创新突破。

本文依托长乐外海海上风电场 C 区工程项目, 基于“冠盛一航”起重船在约 40 m 水深海域进行浮态吊装风机的实际作业案例, 系统分析了起重船浮态吊装作业在中深水海域的适用性评估要点、施工过程中的关键技术控制措施及作业效率。通过对作业过程中遇到的工程问题、应对措施及施工参数的系统总结, 提出了相关优化建议, 并在实践基础上开发形成了实用新型专利“一种起重船浮态安装风机机舱的导向装置”, 显著提高了吊装过程中机舱导向与就位精度。研究成果为后续深远海区域风电项目中起重船浮态安装风机的技术应用提供了有力支撑和工程经验参考。

1 项目背景

长乐外海海上风电场 C 区项目位于福州市长乐区东部海域的闽江口南岸, 场址距离长乐海岸线 30~50 km, 该海域平均水深 37~45 m, 风电场 C 区场址规划面积为 58.6 km², 本风电场共布置单机容量 8 MW 及以上的海上风力发电机组共 57 台, 总装机规模为 496 MW, 其中 10 MW 风机 20 台。由于 10 MW 机舱重达 560 t, 加上工装及吊具重量, 安装船吊重能力需达到 730 t 以上, 起吊

高度需达到 130 m 以上，因此满足项目需求的风电安装船较少，再加上受抢装潮影响，导致可投入的安装船不足，为加快安装进度，在进行船舶适用性分析，综合海况影响后，起重船首次尝试在深水浮态安装风机，共计安装 13 台 10 MW 风机，且施工效率比较高。

2 起重船吊装风机适用性分析

虽然起重船浮态安装风机对海况要求高，与常规风机安装船相比存在一定不足，但起重船在风机机位间转移速度较快，操作性能高，使用费

率较低，数量充足，在常规风机安装船不足的情况下，可以作为一种替代方案。

2.1 船舶主要性能介绍

1) 吊高、吊重统计

风机安装之前需对船舶整体吊装能力进行统计，统计内容包括：船舶自身参数以及主、副钩吊重曲线，履带吊吊装能力。“冠盛一航”船长 168 m，型宽 52 m，型深 11.8 m，该船具体参数见表 1，吊重曲线见图 1。

“冠盛一航”船甲板配有 1 台 280 t 履带吊，臂

表 1 “冠盛一航”起重船参数表

船舶参数		主钩			副吊钩		小钩	
起重量/t	旋转	—	1 500×2	150×2	1 000	200	280	100
	固定	2 300×2	—	150×2	1 000	200	280	100
工作幅度/m		47	47	118.79	52.5	132.52	59.2	150.34
甲板以上起升高度/m		125	125	68.6	145	76.2	168	85.8
甲板以下起升高度/m		6	6	6	6	6	6	—
起升速度/(m·min ⁻¹)		3			6		8	
单程变幅时间/min		约 30						
旋转速度/(r·min ⁻¹)		0.1						
尾部半径/m		23						
船体尺寸		168 m×52 m×11.8 m						

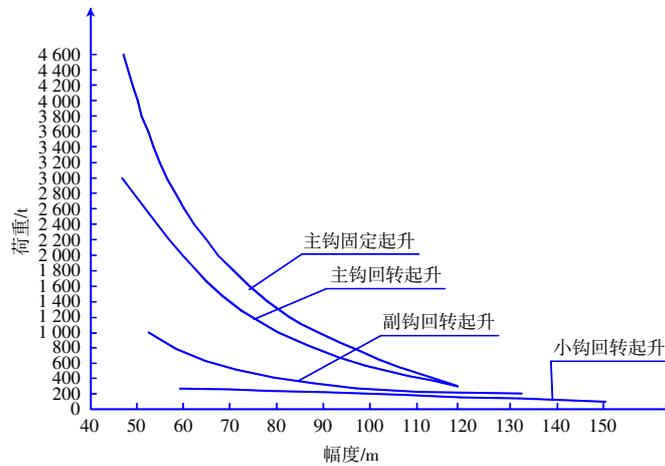


图 1 “冠盛一航”起重船主、副、小钩负荷曲线图

长 59 m，该履带吊主要用于配合塔筒翻身以及风机安装辅助作业，履带吊起重参数见表 2。

表 2 59 m 臂长履带吊起重参数表

作业半径/m	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
起重量/t	129	116	98	84	73	65	57	50	45	40	36	33

2) “冠盛一航”最大允许工况说明：

作业水域为港口、遮蔽水域环境条件以及类似环境下的近海区域，风力 9 级以下可在近海航

区内拖航调遣，风力 10 级以下可于施工现场锚泊抗风，风力 12 级以下可于港内或锚地锚泊抗风，船舶最大横向静倾角 $\beta \leq 2^\circ$ ，纵向静倾角 $\beta \leq 1.5^\circ$ ，船舶最大横向动倾角 $\beta \leq 3.5^\circ$ ，纵向静倾角 $\beta \leq 1.5^\circ$ 。

3) 锚泊系统适应能力

冠盛一航定位锚机配备 8 台 16 t 大抓力锚，缆绳长度 1 700 m，可在水深 70 m 以内抛锚驻位，

抛锚长度 1 200 m 以上时可以在现场抵抗 10 级以下风力。

2.2 起重船吊装适用性分析

风机安装主要涉及 3 方面的分析：吊重、吊高以及回转半径分析。分析之前需提前统计风机部件起重量，通过查询吊重曲线表确定回转半径范围，然后确定满足起吊高度要求下的回转半径范围，两者回转半径的较小值即为所需回转半径，在该回转半径以内的所有吊装作业均能满足施工要求。首先统计风机各个部件的尺寸及重量，根据风机部件重量及尺寸结合船机吊重曲线，通过 CAD 或 Revit 软件模拟吊装过程进行适用性分析，风机部件尺寸见表 3。

表 3 风机部件尺寸表

部件	外形尺寸/m	重量/t
底段塔筒	$\phi 7.8 \times 12$	197
中一段塔筒	$\phi 7.8 / \phi 7.1 \times 23.3$	139
中二段塔筒	$\phi 7.1 / \phi 6.15 \times 27.1$	128
顶段塔筒	$\phi 6.15 / \phi 5.43 \times 29.9$	117
机舱组合体	$22 \times 8.7 \times 10.5$	510

2.2.1 回转半径范围内的吊重校核

1) 底段塔筒：底段塔筒立运至现场，可使用副钩直接进行起吊，底段塔筒重 197 t，吊具重 13.6 t，考虑 1.1 倍动力系数，则所需吊重为 231.66 t^[3]；通过查询图 1 起重吊装曲线图，冠盛副钩作业半径为 80 m 时，对应吊重为 400 t，满

足吊重要求。

2) 双机抬吊塔筒翻身：中一段塔筒、中二段塔筒、顶段塔筒中，中一段塔筒最重，采用塔筒最重段进行校核，考虑 1.1 倍动力系数，塔筒翻身时“冠盛一航”副钩所需最大吊重为 167.86 t^[3]；冠盛副钩作业半径为 95 m，此时吊重为 287 t，满足吊重要求。

塔筒抬吊翻身时，按照 1.1 倍动力系数，1.2 倍不平衡系数，则分配至履带吊的吊重为 92.07 t；280 t 履带吊选取作业半径为 11 m，此时吊重为 123.8 t，按照抬吊取吊重能力的 80% 则为 99 t 大于 92.07 t，满足吊重要求。

3) 机舱组合体：机舱组合体重 510 t，吊具重 34 t，考虑 1.1 倍动力系数，则所需吊重为 598.4 t^[3]，双主钩作业半径 65 m 时，对应吊重为 1 658 t，满足吊重要求。

2.2.2 吊高校核

使用 CAD 模拟吊装过程，所需安装部件均根据厂家提供的尺寸数据 1:1 比例绘制，东方电气 10 MW 风机机舱组合体吊高要求距海平面 130 m，考虑摘钩和吊索具配置情况，所需海平面以上吊高为 $130 + 2 = 132$ m，作业半径 47 m 时，涨潮 3 m 后双主钩吊高 134 m，吊高满足要求。因吊重分析时双主钩作业半径为 65 m，吊高分析时双主钩作业半径 47 m，选两者较小值，故选择 47 m，吊高吊重均满足要求。吊装过程校核图如图 2 所示。

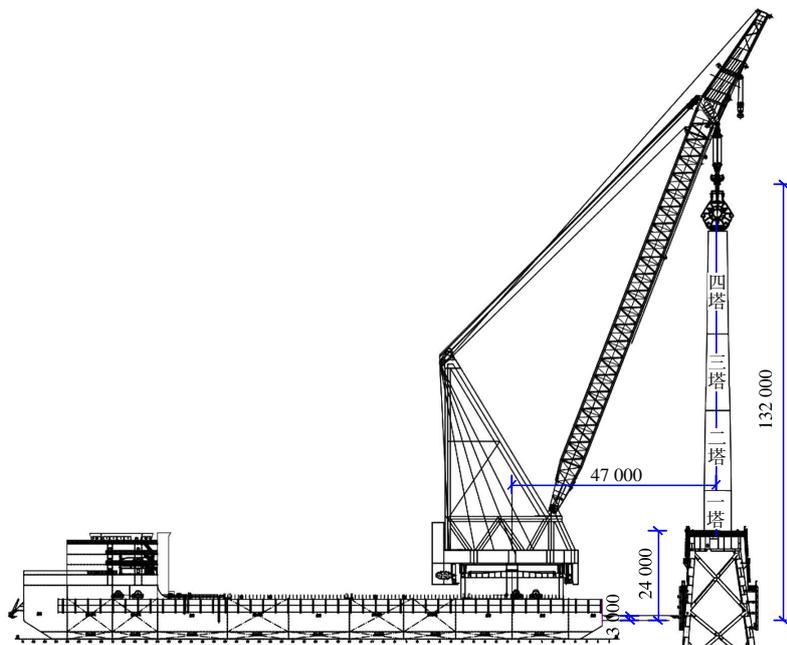


图 2 机舱组合体吊装校核图 (mm)

2.3 塔筒及主机安装

为降低吊装期间风机部件安装的操作难度，“冠盛一航”根据长乐外海水域的常年水流方向（东北—西南向）及涌浪特性，采取顶流驻位作业策略。作业前，通过调节压载水分布，增加船舶吃水和稳性，确保船舶艏向朝向主涌浪方向，以有效减小横摇响应，提升作业稳定性^[4]。

吊装塔筒时，船尾距离风机基础中心控制在约 30 m，吊装机舱组合体时，通过绞锚使船尾距离基础中心缩短至 19 m，锚泊配置采用船首抛 3 根锚，船尾抛 3 根锚的布置方式，为防止锚泊系统失效，单侧抛锚距离约 1 000 m，确保足够的锚链张力与吸力以抵抗作业期间环境荷载，抛锚驻位及作业布置见图 3。

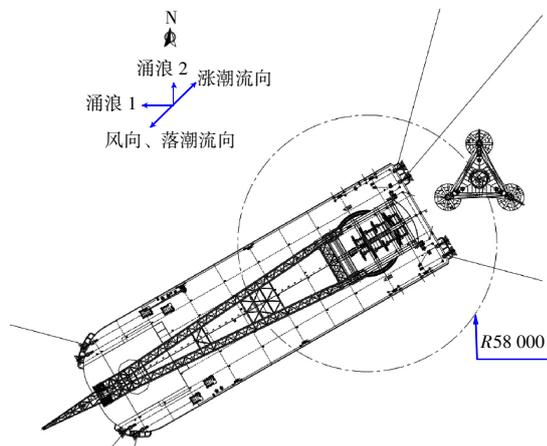


图 3 船舶驻位图(mm)

2.3.1 塔筒安装工艺控制要点

1) 起吊塔筒待塔筒离开甲板面约 1 m 后，清理塔筒下法兰的灰尘杂质，并在塔筒下法兰安装 2 根导向缆风绳，使用缆风绳控制底段塔筒的方向，使底段塔筒慢慢转至基础顶，将两者同轴心对正，缓慢下降底段塔筒，安装人员通过缆风绳旋转塔筒方位，塔筒方位初定位，底段塔筒继续缓慢下降，待塔筒法兰面与基础法兰上表面之间距离为 100~150 mm 时，拖拽缆风绳，使 2 个法兰的相对标记对齐，穿入定位销进行精定位，继续缓慢下放塔筒，使其着力于垫块上，然后穿入螺栓、垫片及螺母，解去缆风绳和导向结构后再撤出垫块。

2) 继续缓慢下降塔筒底段，直至两法兰面贴合紧密后，电动扳手初步预紧所有螺母，然后使用液压工具紧固，按额定力矩的 50%、75%、

100%(11 290 N·m)分三级对称预紧螺栓，所有螺栓预紧后，使用记号笔做防松标识，根据相同的工艺措施，依次安装 2—4 段塔筒。

2.3.2 安装机舱组合体工艺控制要点

首先检查机舱组合体及其它工具，确认各部件完好，将机舱内外清理干净，尤其是机舱法兰面和刹车盘，为节省工作时间，提前将机舱组合体安装所需要的零部件及工具放于机舱内一同起吊。机舱组合体安装作为起重船浮态安装风机的关键工序，安装前及安装中均需要加强管控，首先使用“冠盛一航”双主钩挂机舱组合体专用吊具，起吊专用吊具于机舱组合体正上方，进行机舱组合体吊索具悬挂，示意图见图 4。

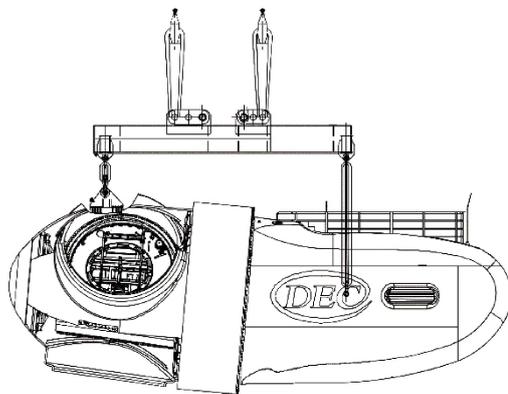


图 4 机舱组合体吊具悬挂示意图

吊索具安装完成后试吊机舱组合体检测是否水平，若不水平，通过调整辅助机舱侧吊具上方手拉葫芦长度，直至机舱组合体达到水平度要求，同时为保证安装顺利，需使机舱组合体水平轴线与吊臂呈垂直状态，将起重船的 2 个索具钩分别挂在机舱组合体吊具前后两端，同时机舱组合体吊具通过 2 根缆风绳连接至吊机上部卷扬机，辅以人工柔性牵引，用于调整机舱组合体方向。

针对机舱组合体与塔筒对接时受波浪扰动导致的定位精度低、碰撞风险高的问题，研究开发了内插式导向装置。该装置由对称布置的导向板组件构成，单个导向板采用“U 形防撞边沿+双加强筋板”结构设计，通过螺栓固定于机舱偏航轴承螺孔附近。导向板内侧加工为与塔筒法兰外沿匹配的圆弧导向面，外侧焊接防撞 U 板以缓冲对接冲击，顶部通过椭圆顶板集成螺栓孔，实现与机舱结构的快速拆装连接。

起吊时需做以下准备工作，时刻关注船舶姿

态,通过压载水调节船舶重心,确保船舶横倾 $\leq 0.5^\circ$,纵倾 $\leq 1^\circ$,避免吊装时因船体晃动导致风机碰撞,同时关注潮汐变化,选择平潮时段进行对接,减少相对运动,需要提前起吊主机,确保主机与塔筒对接时处于平潮时段,根据施工过程晃动量统计分析,在低平潮时段晃动量最小。

起吊机舱组合体至地面约1.5 m后,用清洗剂清洗刹车盘,并用棉纱清理干净,用丝锥检查偏航轴承与塔筒连接螺纹孔,然后安装内插式导向装置(结构模型见图5),导向装置选用6个导向板,通过螺栓连接均匀安装在偏航轴承螺孔附近位置。



图5 导向装置模型图

机舱组合体安装前需将塔筒顶部法兰清理干净,严禁涂抹密封胶,起吊机舱组合体后,通过缆风绳调整机舱方位,在对准主风向后,继续提升机舱组合体高度直至到达塔筒顶部,通过内插式导向板使机舱与塔筒顶部达到初定位,然后调整机舱位置,通过精定位导向销使主机螺栓孔与塔筒法兰连接孔对正。将双头螺栓拧入机舱法兰,螺栓露出塔筒法兰端面长度为 (100 ± 1) mm,然后安装螺母,先用扳手初步拧紧螺母,防止安装拉伸器时螺柱旋转,用液压拉伸器分3级进行预紧,预紧力分别为550 kN—825 kN—1 100 kN,预紧过程需沿圆周方向均匀对称紧固螺母,待螺母终紧后,螺母做防松标识。螺母紧固期间,吊具需保持受力状态,同时为减少吊具晃动,吊索具可分级减少吊重,待所有连接螺栓紧固到50%额定扭矩值后方能松钩,安装人员进入机舱内拆除吊具,至此浮态安装风机部件工作全部结束。

2.3.3 安装工效对比分析

为发挥最大安装工效,通过优化工艺流程,节省总体安装时间,“冠盛一航”可以利用海况较差的时候过驳塔筒和主机,保持甲板上至少存放1套塔筒和主机,虽然自升式平台船升起后,不受风浪、流的影响,但海况差时会受限于运输船无法靠泊驻位而影响安装,因此两类船舶基本处

于同一作业条件,且起重船机动性更强,机位间移动时可节省较多时间,同时平台甲板面积更大,可以存储较多的风机部件,起重船安装风机更具有优越性。

在风机安装工效对比中,起重船与自升式平台船呈现显著差异。起重船抛锚驻位至具备吊装条件需4 h,设备预存于船上无需额外过驳时间;自升式平台船插腿、升平台等准备阶段累计耗时达12 h。单台风机吊装阶段,两者塔筒及机舱组合体吊装时间相同(塔筒4段合计8 h、机舱吊装5 h),但起重船爬锚移位仅需3 h,自升式平台船移位及再次准备累计需16 h。综合来看,起重船完成单台风机安装(含移位)累计需33 h,自升式平台船需54 h,前者效率提升约40.7%。其核心优势在于设备预存、机动性强,可利用海况较差时段提前过驳储备部件,避免运输船驻位及过驳耗时,且机位间移位流程更短,整体工效显著优于自升式平台船。

3 浮态安装船舶作业性能分析

根据“冠盛一航”起重船在该海域相关施工经验及船舶运动统计^[9],浮态安装风机主要考虑以下内容:1)涨落涌浪波长与船体尺度的匹配关系,当涌浪波长显著大于或接近船舶总长时,船体纵摇响应加剧,可能对吊装作业稳定性产生不利影响;2)抛锚系统配置及锚链长度设计,应确保在作业期间锚泊系统能够有效控制船舶水平漂移,防止锚泊失效引起船舶位置偏移;3)风机塔筒与机舱对接阶段,需控制风机部件在水平及竖向方向的相对位移幅值,使其保持在允许安装公差范围内,以保障吊装对接精度和作业安全性。

起重船浮态安装作业需要考虑以下内容:

1)船舶作业期间受风、浪、涌的多重作用影响,通过“windy”以及“全球潮汐”软件观测,在风速 < 10 m/s,浪高 < 1 m,可尝试作业,在满足两者条件的前提下,需重点考虑暗涌的波长影响,通常暗涌波长计算采用的经验公式为: $\gamma = g \times T^2 / 2\pi$ 。式中: γ 为波长,m; g 为重力加速度,取 9.8 m/s²; T 为2个波峰/波谷周期,s。

在波长短于船体长度时,可减少船体晃动, T 的数值以全球潮汐发布为准。根据施工工况统计值分析,在满足以下海况条件时,起重船可进行浮态安装作业:风速 < 10 m/s,浪高 < 1 m,涌浪高度 < 0.5 m。

2) 通常情况下船舶驻位锚缆长度抛设越长船体稳性越好, 根据长乐水深情况以及地质情况分析, 在钢丝绳出缆长度小于 10 倍水深时容易发生走锚, 因此根据施工经验得知, 钢丝绳出缆长度至少需达到 10 倍以上水深才可以保证船舶稳定, 为防止走锚情况发生, 通常使用相应船舶的最长抛锚长度。

3) 根据施工经验得知, 在对接安装时, 当被吊物与对接面水平位移 $<0.5\text{ m}$, 竖向位移 $<0.3\text{ m}$, 可以在保证人员安全的条件下顺利完成风机部件安装工作。根据现场施工作业情况统计得出, 在潮位处于最低潮或者最高潮时船舶稳性相对较好, 低平潮比高平潮时船舶稳性较好, 为提高对位精度, 需时刻关注潮水变化, 在平潮到来前 1 h 提前做好准备, 将机舱运输工装拆除, 安装导向装置, 并提前起吊至指定高度, 在潮位处于平潮时进行机舱对位安装。

4 结语

本文从起重船施工前的吊重、吊高的核算到

施工过程中驻位方式选择, 以及在风机安装过程中控制要点进行总结, 并对施工工效进行统计, 得出了起重船浮态安装大兆瓦风机的施工经验及操作要点, 拓宽了起重船在深远海海上风电领域作业的功能, 虽然起重船浮态安装风机受到一定海况条件限制, 但在使用主动式升沉补偿吊具等缓冲设备后, 会大大降低对海况的要求, 本文的浮态安装风机施工工艺研究, 对后续深远海海上风电项目风机安装具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李志川, 骆洪林, 邳帅, 等. 海上风电自升式安装船能力及趋势分析[J]. 自动化应用, 2024, 65(5): 109-111.
- [2] 米立军, 李达, 高巍. 深远海漂浮式风电技术发展现状与思考[J]. 新型电力系统, 2023, 1(3): 211-220.
- [3] GB/T 40788—2021, 船舶与海上技术 海上风能港口与海上作业[S].
- [4] 李森, 余良辉, 周力伟. 港珠澳大桥岛隧工程钢圆筒制造技术[J]. 中国港湾建设, 2012(4): 78-80.
- [5] 汪娟娟, 黄衍顺, 李怀亮, 等. 吊重作业起重船波浪中的运动响应[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(3): 50-57.