

南日岛海域海上自立型测风塔设计施工技术探讨

李近元, 张 吉, 王 森, 盛迎新, 祝 亮, 董礼涛

(中能电力科技开发有限公司, 北京 100034)

摘要: 为获得南日岛海域的风能资源数据, 在该海域设计建造了一座自立型测风塔。在测风塔的基础设计、施工过程中, 分析计算了海上特殊施工环境中的基础受力、设计参数及荷载组合, 因地制宜地采用多种基础施工工艺、防腐处理等技术; 在塔体安装时采用了整体吊装技术, 并设计了引导装置保证了塔体准确就位。该工程可为海上风电场开发及类似海上工程提供参考。

关键词: 海上测风塔; 设计参数; 防腐; 施工工艺

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2013)02-0095-06

开发可再生能源是我国能源发展战略的重要组成部分, 风力发电是可再生能源领域中技术最成熟、最具规模开发条件和商业化前景的发电方式之一^[1]。海上风能是更具开发价值的可再生能源。根据中国气象局风能资源详查的初步统计, 我国 5~25 m 水深线以内近海区域、海平面以上 50 m 高度风电装机容量约 2 亿 kW。国家关于海上风电开发的蓝图已经铺开, 由于海上气象观测资料缺乏, 可供利用的海岸气象历史资料又具有局限性, 利用现有数据来评估海上风能资源难度较大。

为准确获取规划风电场海域风能数据, 最直接的方式就是在规划海域建造海上测风塔, 进行风资源测量与评估^[2]。目前我国建设的海上测风塔数量极少。本文主要以福建南日海上测风塔的设计及施工为例来进行技术探讨, 以期今后的海上测风塔工程提供参考。

1 工程概况

1.1 概况

南日海上测风塔位于福建省莆田市海域, 在兴化湾和平海湾交汇处, 离岸 4.5 km, 平均水深 12 m, 其东北侧开阔, 风浪较大。涨落潮方向为东西向, 流速不大。工程地理位置为福建省中部沿海地区, 冬季主要受东北季风影响。场地上覆第四系冲海积层, 下伏基岩为燕山晚期花岗岩。本区的地震烈度, 按《中国地震区域划分图》划分, 属 ~ 度区^[3]。

1.2 地质水文情况

1.2.1 地质勘察

根据勘察报告, 建设场地地层为: (1)砂混淤泥,

以中砂粒为主含有贝壳碎屑, 层厚 0.70 m; (2)粉质黏土, 厚度 1.60 m; (3)残积黏性土, 厚度 4.20 m; (4)全风化花岗岩厚度 2.20 m; (5)砂土状强风化花岗岩厚度 4.50 m; (6)碎块状强风化花岗岩厚度 3.60 m; (7)中风化花岗岩未揭穿。地基基础设计参数建议值见表 1。表中抗剪强度值为快剪法直剪, 预制桩、钢管桩对应的力均为标准值。

1.2.2 水文条件

场地最大水深 15.34 m, 最小水深 8.65 m, 有效波高主要分布在 0.5~1.5 m 范围内。

场地水文条件主要受潮汐潮流影响, 该处潮汐类型为规则半日潮, M_2 分潮占主导, 且涨落潮时间不等, 浅海分潮影响明显^[4]。

1.2.2.1 潮汐

根据厦门海洋站在南日设置临时潮位站 1 个月的实测资料分析, 其特征潮位见表 2。表 2 中潮位均为假定基面(在海图深度基准面下 0.18 m)上的值。

1.2.2.2 波浪

据平海海洋观测站资料, 该区域常浪向 NE, 频率 46.6%, 次常浪向 SSW, 频率 11.7%。强浪向 SE, 最大波高 7.5 m。次强浪向 S, 最大波高 5.5 m。平均波高 0.7 m, 平均周期 3.4 s。最大平均波高 0.8 m, 出现在 SSW, SW, WNW 向^[3]。

1.2.2.3 海流

兴化湾及附近海域为往复式潮流, 其中靠近小

收稿日期: 2012-07-12; 修回日期: 2012-12-22

基金项目: 中国国电集团公司科技项目

作者简介: 李近元(1984-), 男, 山东济宁, 工程师, 硕士学位, 从事海上风电开发技术研究, 电话: 010-66091514, E-mail: lijinyuan84@126.com

表 1 地基基础设计参数建议值

Tab. 1 Recommended values of foundation design parameters

岩土层序号及名称	f_{ak} (kPa)	γ (kN/m ³)	C (MPa)	Φ (°)	q_{sik} (kPa)	q_{pk} (kPa)	λ
(1)砂混淤泥	90	—	—	—	30	—	0.50
(2)粉质黏土	200	19.5	40.2	10.3	45	—	0.75
(3)残积黏性土	200	18.3	19.2	15.5	50	—	0.70
(4)全风化花岗岩	350	19.0	30.0	30.0	90	—	0.50
(5)砂土状强风化花岗岩	500	21.0	25.0	35.0	110	9000	0.70
(6)碎块状强风化花岗岩	750	22.0	—	—	—	—	—
(7)中风化花岗岩	2000	25.0	—	—	—	—	—

注: f_{ak} 表示地基承载力特征值; γ 表示天然重度; C 表示抗剪强度黏聚力; Φ 表示抗剪强度内摩擦角; q_{sik} 表示钢管桩桩侧极限摩阻力; q_{pk} 表示钢管桩桩端极限端阻力; λ 表示抗拔系数

表 2 南日临时潮位站潮汐特征值

Tab. 2 The feature values of tides in temporaty tide stations in Nanri

潮位(m)				潮差(m)	
最高潮	最低潮	平均高潮	平均低潮	最大潮差	平均潮差
7.85	1.18	6.71	2.10	6.30	4.61

日岛附近涨、落潮流速最大; 垂线平均潮流最大流速为 152 cm/s; 余流最大为 10 cm/s^[5]。

2 测风塔设计

2.1 基础设计参数及荷载组合

2.1.1 风荷载

设计风速按 40 m/s 考虑。

风荷载标准值按以下公式计算:

$$W_k = \beta_z \mu_s \mu_z W_0 D \mu_r (1 + \mu_c)$$

其中: β_z 表示风振系数, 整塔风振系数取 1.9; μ_s 表示风结构体型系数, 取 0.8; μ_z 表示风压高度变化系数, 采用指数形式, $\mu_z = (z/H)^{2\alpha}$, $\alpha = 0.12$; μ_r 表示风重现期调整系数, 取 1.0; μ_c 表示风荷载扩大系数, 取 0。

2.1.2 波浪力

忽略平台的动力响应和由平台引起的入射波浪的变形, 对固定平台上的静设计波浪力进行计算。桩体全断面上与波向平行的正向力 P 由速度分力 P_D 和惯性分力 P_I 组成, 其公式:

$$P = P_D + P_I = \frac{1}{2} C_D \frac{\gamma}{g} D u |u| + C_M \frac{r}{g} A \frac{\partial u}{\partial t}$$

C_D 为速度力系数; C_M 为惯性力系数; u , $\frac{\partial u}{\partial t}$ 分别为水质点轨道运动的水平速度(m/s)和水平加速度(m/s²)。

计算得波浪力 38.94 kN。

2.1.3 船舶(或漂浮物)撞击荷载

按照海洋构筑物常用的公式设计船舶碰撞荷载

$$P_O = V^{2/3} L^2 / 1100$$

经调研取当地较常出现的渔船进行设计, 船速 V 取其正常航行速度 3 kn(约 1.5 m/s), 船长 L 取 12 m, 并考虑 1.2 的安全系数, 计算得到设计船舶撞击力为 200 kN。

2.2 结构受力分析

考虑各工况相应的风、浪、流荷载作用, 并在测风塔运行工况下考虑船舶撞击力作用。风、浪、流等荷载考虑两种不同的作用方向: (1)垂直于塔架某一侧面; (2)与塔架某一侧面成 45° 夹角。

2.3 基础桩型选择

根据拟建场地的工程地质条件, 结合拟建物的结构形式及荷载情况, 参考类似场地施工的成功经验, 拟建场地不具备采用天然浅基础的条件, 应采用桩基础^[6]。

经计算, 最终确定基础选用 Q235 级钢管桩, 选取碎石状强风化花岗岩为主要持力层, 桩底嵌入碎石状强风化花岗岩应不得小于 3.0 m。钢管桩桩端采用开口形式, 内部全部灌注 C30 防收缩混凝土, 桩顶伸入承台应不小于 10 cm。

经计算确定设计单桩承载力 5 099 kN, 水平承载力 2 690 kN, 整体破坏时单桩的抗拔承载力为 5 151 kN, 非整体破坏时单桩的抗拔承载力为

2 478 kN。

经验算, 单桩承受的最大竖向力为 4 981 kN, 水平荷载 310 kN, 竖向拉拔力 610 kN。

2.4 结构防腐设计

为方便结构加工制作, 防腐按塔架、桩等部分进行要求, 具体措施为: (1) 钢管桩、基础部分受力构件及下部 5.5 m 的钢塔架按 0.5 mm/a 的腐蚀速度预留腐蚀余量; (2) 泥面下 7 m 以上部分钢管桩, 无机富锌环氧底漆 2 层厚 75 μm , 环氧中间漆 2 层厚 75 μm , 聚氨酯面漆 2 层厚 50 μm , 漆膜干膜总厚度不小于 20 μm ; (3) 承台钢筋亦应进行防腐处理, 鉴于本结构只有 5 年使用期可考虑镀锌或渗锌处理; (4) 上部塔架及其他钢结构采用热镀锌防腐, 其镀锌量不小于 275 g/m²。

3 测风塔的施工及安装

3.1 桩基施工工艺

3.1.1 沉桩定位

考虑到作业环境和精度, 打桩船上 GPS 接收信号必须要稳定, 这样才能保证沉桩定位准确。桩顶标高控制要求高, 采用 GPS 控制桩顶标高很难达到误差小于 50 mm, 所以在沉桩将达到设计标高(约高 50 cm)之前, 用 RTK 进行高程复测。

3.1.2 沉桩操作

桩基施工所需的船舶主要为运桩船、打桩船、抛锚船等。鉴于海上施工的特点, 打桩船必须配备合适的桩锤, 选用合适的施工工艺, 尽可能提高沉桩效率, 且应具有良好的可靠性。

施工工序为: 起桩→立桩→插桩→锤击沉桩→停锤→移位→下一根桩起桩→搭设围囹。鉴于海上施工的特点, 打桩船必须配备合适的桩锤, 根据当地地质条件等情况, 宜采用吊钟式替打, 如图 1 所示, 替打的导向板宜插入钢管桩内部 300 ~ 500 mm。

为防止在风浪、水流及斜桩自重下发生桩倾斜、偏位等, 可采取以下措施: 沉桩后应及时采取可靠措施连接桩头; 当预计出现台风或大浪时, 必须检查桩头连接情况, 并采取必要的加固措施。

3.1.3 桩端加固

钢管桩顶和桩端可以不采取加固措施, 但当桩端需穿越障碍物, 或打入坚硬土层时, 需对桩顶或桩端进行加固, 必要时可设置桩靴。

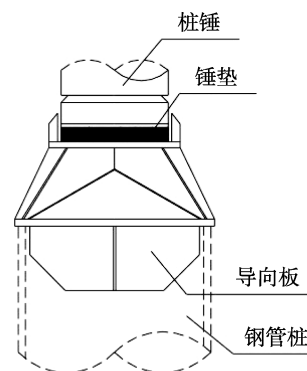


图 1 吊钟式替打

Fig. 1 The mat-like hanging bell

3.1.4 混凝土灌注

进行钢管桩混凝土灌注前先进行清孔, 清除沉桩过程中挤入桩内的土体后立即进行灌注, 由桩底向上灌注混凝土, 当钢管桩上端返浆后, 慢慢拔出注浆管, 终灌前进行补灌混凝土, 等水泥浆不断溢出钢管口直至“新鲜水泥浆”溢出, 以保证孔内灌满。在注浆完成 1 h 后, 用钢筋探测浆液沉淀情况, 如浆液收缩浆面下沉, 则应及时进行补浆。对每根桩浆液随机取样, 并制备一组水泥试块。

3.1.5 施工注意事项

沉桩时, 若出现贯入度反常现象, 应停止锤击, 查清原因后继续沉桩。在施工过程中要检测桩身完整性, 对桩基承载力进行分析判断, 可采用高应变法, 通过波动理论分析、判断钢管桩是否符合设计要求^[7-9]。

3.2 承台施工

采用钢筋混凝土现场制作承台, 具体步骤为: (1) 承台采用吊模施工, 进行现场管桩与钢筋笼接头混凝土的浇筑并使钢管桩顶深入承台不少于 10 cm。(2) 钢筋笼与钢管桩接头浇筑完成后, 组装钢模板, 在模板检查后进行浇筑, 振捣并养护。承台内钢筋密布, 必须加强振捣, 不得漏振, 钢筋保护层厚度允许误差为 +10 mm 和 0 mm。(3) 结合海上施工条件, 采取分层浇筑方式进行施工。混凝土层面间必须加强凿毛后方可继续浇筑混凝土。(4) 承台为大体积混凝土, 施工时应采取埋设降温水管路等有效措施以降低水化热。(5) 混凝土浇筑完毕后应及时加以覆盖, 终凝后浇水养护, 养护应用淡水。缺乏淡水时, 应涂养护剂并用塑料薄膜覆盖进行养护。覆盖要求严密, 要经常检查塑料薄膜或养护液膜的完整情况和对混凝土的保湿效果。(6) 质量要求: 表面平整洁净, 混凝土

土蜂窝麻面不得超过规定允许比例。表面裂缝宽度大于 0.1 mm 者均需处理。预埋件外露部分经过防腐蚀处理。(7)待混凝土达到规定强度后,拆除桩群临时连接系。

3.3 塔体安装

3.3.1 塔体基本情况

塔高 100 m, 主要钢材料质采用 Q345B, 并设有爬梯。塔体共 17 节组成, 最长 9 600 mm, 最短 5 000 mm; 最大管径 560 mm, 最小管径 102 mm, 设计最大抗风等级 12 级。

3.3.2 安装施工

测风塔所在海域常年风力为 5~8 级, 增加了塔体安装难度, 为节省时间, 提高效率, 故采用整体吊装方式安装。

3.3.2.1 吊高核算

测风塔总高 $H=105$ m, 水面至承台高度按照 $h=12$ m 来计算, 测风塔重心在 35 m 处, 吊点设置在 55 m 处不影响吊高, 那么吊高要求: $H+h=117$ m。

3.3.2.2 吊重核算

测风塔重量为 $G=105$ t, 动载系数取 1.2, 则吊重核算应为: $1.2G=124$ t。

3.3.2.3 浮吊阻力计算

根据上述核算结果, 选定满足以上条件的浮吊。在进场作业前, 对浮吊阻力进行计算。

测风塔吊装在 5 月份进行, 按历史当月最大水的流速及施工情况分别计算浮吊在吊装过程中所受的外力大小, 计算公式根据港口工程荷载规范 (JTJ215—98) 计算浮吊的水阻力。

浮吊水阻力计算:

$$F_W = C_W V^2 A \rho / 2$$

$$C_W = 0.046 \text{Re} - 0.134 + b$$

$$\text{Re} = VL/v$$

其中: F_W 表示水阻力标准值(kN); C_W 表示水阻力纵向分力系数; V 表示水流设计流速(m/s); ρ 表示水的密度(t/m^3); A 表示计算构件在与流向垂直平面上的投影面积(m^2); Re 表示水流对船舶作用的雷诺数; L 表示船舶吃水线长度(m); v 表示水的运动黏性系数(m^2/s), 取 $v=1.00$; b 为系数, 取 $b=0.031$ 。

风压就是垂直于气流方向的平面所受到风的压力。根据伯努利方程得出的风 - 压关系, 风的动压为:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2$$

其中 P 表示风压(kN/m^2); ρ 表示空气密度(kg/m^3); v 表示风速(m/s)。

此式为标准风压公式。在标准状态下(气压为 1 013 kPa, 温度为 15°C), 空气重度 $r=0.01225$ kN/m^3 , 重力加速度 $g=9.8$ m/s^2 , 7 级风风速为 13.9~17.1 m/s , 考虑工程安全, 取风速为 17.1 m/s 。计算得 $P=0.183$ kN/m^2 。

根据计算结果, 浮吊横向吊装时的临时锚碇系统最小锚着力为 188.2 kN, 能满足要求。

3.3.2.4 浮吊定位系统布置

按照浮吊定位横向总阻力 $P=188.2$ kN 进行计算。

布设铁锚数量共 4 个, 分别为 2 个 8 t, 2 个 7 t 边锚(上下游各两个, 均是海军锚), 边锚与水流方向成 20° 夹角。该海域海床覆盖层为砂质土, 铁锚总承载力: $P_1=280$ kN, 竖向承载力: $P_2=2P_1 \cos 20^\circ=526.2$ kN, $P_2 > P$ 。锚缆钢丝绳, 选用钢丝绳破断拉力为 $P_3=1\ 185.0$ kN。

取 $\alpha=0.85$, 则计算得钢丝绳安全系数 $K=\alpha P_3/P=5.35$, 满足 $3 \leq K \leq 6$ 的规范要求。

$$\text{钢丝绳长度 } L_m = \sqrt{2h + 2hF/\gamma}$$

其中: h 表示锚马口至海床面的高差, 取 $h=18.0$ m; F 表示锚的水平拉力, 取 $F=94.1$ kN; γ 表示钢丝绳在水中重力, 钢丝绳在空气中重力为 0.14743 kN/m, 在水中重力取空气中的 70%, 则 $\gamma=0.103$ kN/m。

计算得 $L_m=182$ m。取 $L_m=200$ m。

以上计算时按海上锚固计算。通过计算得出: 该锚固系统满足吊装要求。

3.3.2.5 钢丝绳强度校核

钢丝绳选用直径 90 mm 长 40 m, 共 4 根。由吊点布置可得钢丝绳夹角为 8°, 最重件为 124 t。

$$F = G / n \cos \alpha = 31 \text{ t}$$

F 表示钢丝绳所受的力, G 表示最重吊物重量, α 表示钢丝绳与吊物垂线间夹角。

$$S_{\text{许}} = S_{\text{破}} \kappa / K = 55 \text{ t}$$

$S_{\text{许}}$ 表示钢丝绳许用应力; $S_{\text{破}}$ 表示钢丝绳破断拉力总和, 取 $S_{\text{破}}=400$ t; κ 表示钢丝绳捻制折减系数, 取 $\kappa=0.82$; K 表示安全系数, 取 $K=6$ 。

由于钢丝绳是对折兜住挂钩因此应乘以 $a=1.25$ 的系数。故 $S_{\text{许}} \cdot a = 68.75$ t。

$S_{\text{许}} \cdot a > F$, 钢丝绳强度满足强度需要。

3.3.2.6 扳正、安装作业

首先将塔架在码头进行组装, 组装完成后, 由

浮吊对塔体进行起吊扳正。图 2 为扳正作业示意图。

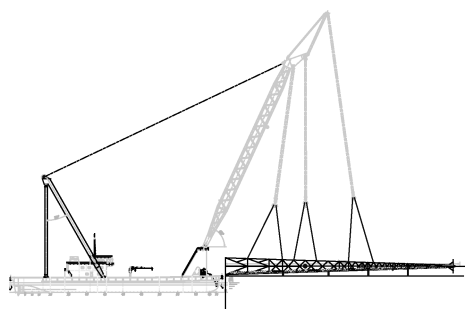


图 2 扳正作业示意图

Fig. 2 The schematic diagram of raise up

将塔体扳正吊起后,运抵安装现场,运输过程中,浮吊船首两端各有一根风绳带在测风塔底端以免测风塔晃动,经计算测风塔的重心在 35 m 处,塔体呈锥形,倾角很小。图 3 为运输塔体示意图。

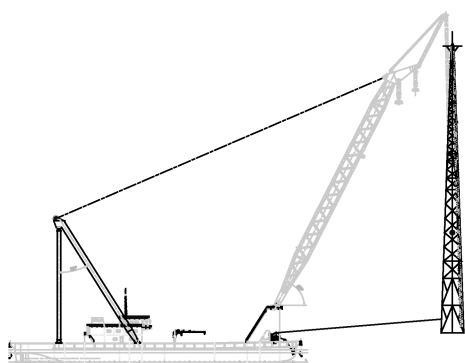


图 3 运输塔体示意图

Fig. 3 The schematic diagram of transporter tower

安装时在承台上的一个角设置限位装置(也叫靠山),便于塔基承台就位。限位装置设计见图 4。

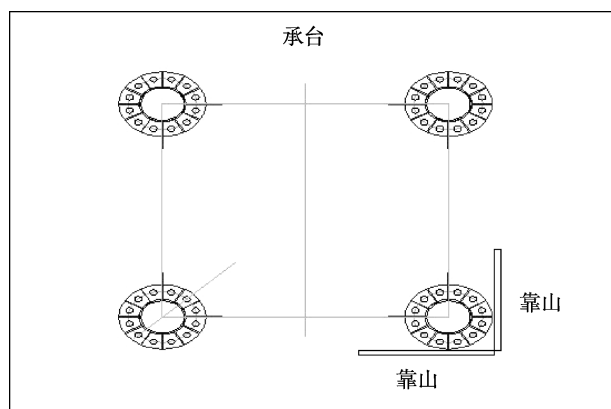


图 4 靠山设计示意图

Fig. 4 The schematic diagram of guideway

4 结语

福建海域地质条件复杂,且常年风力为 5~8 级,施工作业环境恶劣。在对现场情况进行综合分析的基础上,海上测风塔的设计和施工安装等方面采取了以下措施:(1)海上测风塔的基础设计综合考虑了风、浪、流荷载作用,并在运行工况下考虑船舶撞击力作用。承台基础及塔体也采取相应防腐设计措施。根据场地的工程地质条件,结合拟建物的结构形式及荷载情况分析,不具备采用天然浅基础的条件,故采用钢管桩基础,并选取碎石状强风化花岗岩为主要持力层,验算了单桩承受的最大竖向力为水平荷载及竖向拉拔力。(2)结合海域自然条件,承台采取分层浇筑进行施工,针对大体积混凝土采取埋设降温水管路等有效措施以降低水化热,并采用养护剂及塑料薄膜覆盖进行养护,能够更好地保证施工进度及质量。(3)施工海域风浪大、作业环境恶劣,为此采用了整体吊装方案,塔体在码头组装完成,在一个可作业天气内完成了吊装作业。为解决风浪对整体吊装精确就位的影响,设计了靠山,保证了塔体安装的精确就位。

本测风塔在基础设计时综合考虑各方面因素进行荷载及受力分析计算,建设过程中因地制宜,采用了多项适宜的施工措施及工艺。本测风塔建成至今经受了多次台风的考验,至今运行良好。该测风塔的设计施工技术可为海上风电场建设及类似海上工程提供参考。

参考文献:

- [1] Canale M, Fagiano L, Milanese M. KiteGen: A revolution in wind energy generation [J]. *Energy*, 2009, 34(3): 355-361.
- [2] Elkinton M R, McGowan J G, Manwell J F. Wind power systems for zero net energy housing in the United States[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(5): 12701-12781.
- [3] 陈则实, 夏东兴, 王建文, 等. 中国海湾志(第七分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1994: 198-227.
- [4] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [5] 郭玉臣, 王庆业, 陈建军, 等. 兴化湾及周边海域潮流动力特征与数值模拟研究[J]. *海洋通报*, 2012, 31(13): 262-267.
- [6] 吴绵拔. 桩基检测概述[J]. *土工基础*, 2001, 15(3): 67-71.

- [7] 王立成, 宋玉普. 基于水深和地质条件的海洋平台的选型优化[J]. 石油工程建设, 2003, 10: 1-7. 2003: 207-216.
- [8] 殷万寿. 深水基础工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, [9] 王民浩, 陈观福. 我国风力发电机组地基基础设计[J]. 水利发电, 2008, 34(11): 88-91.

Investigation of design and construction technology of offshore anemometer tower in the vicinity of Nanri Island

LI Jin-yuan, ZHANG Ji, WANG Miao, SHENG Ying-xin, ZHU Liang, DONG Li-tao
(Zhong Neng Power-Tech Development Company Limited, Beijing 100034, China)

Received: Jul., 12, 2012

Key words: offshore anemometer tower; design parameter; corrosion protection; construction technology

Abstract: An offshore anemometer tower was constructed to obtain the data of wind energy resources near the vicinity of Nanri Island. During its foundation design, construction and installation, the foundation stress, design parameters and load combinations in the special sea environment were analyzed and calculated. A variety of technologies such as basic construction techniques, antiseptic treatment were adopted. The integral hoisting technology was used in tower installed, and boot devices were designed to ensure the tower to be put exactly in place. The projects would provide references for similar offshore works of offshore wind farms.

(本文编辑: 刘珊珊)