

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.014

# 珠海桂山海上风电场风电机组基础设计

马兆荣, 刘晋超, 元国凯

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 珠海桂山海上风电场是我国南海第一座大型的海上风电场, 其风机基础同时具有海洋结构工程、高耸结构基础、动力设备基础和复杂软弱土地基基础四种显著工程特性, 地基基础设计成为该工程的关键技术难题之一。介绍了该工程风机塔基础设计内容, 重点分析了海洋土参数与桩土相互作用、风机基础结构耦合分析、频率窗口问题、基础结构疲劳分析、防腐设计、灌浆分析等基础设计关键技术。

**关键词:** 海上风电; 导管架基础; 灌浆; 桩土相互作用; 疲劳; 防腐

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0072-04

## Design of Wind Turbine Supporting Structure in Zhuhai Guishan Offshore Wind Farm

MA Zhaorong, LIU Jinchao, YUAN Guokai

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, 510663)

**Abstract:** Zhuhai Guishan Offshore Wind Farm is the first big offshore wind project in the South China Sea. The wind turbine supporting structures have four significant engineering characteristics including offshore structure engineering, towering structure, dynamic equipment, both complicate and soft sea soil as well. Design of wind turbine support structures is one of the most critical and difficult technical challenges in this project. In this paper, general design contents of supporting structures are introduced. Some key technical topics, like soil parameters and pile-substructure interaction, turbine-substructure-foundaton integrated analysis, frequency window problem, structure fatigue analysis, corrosion prevention design and grouted connection design are emphasized in this paper.

**Key words:** offshore wind; jacket; grouting; pile-substructure interaction; fatigue; corrosion prevention

1996—2009 年, 风能的累计装机容量以 28.6% 的年增长率增加<sup>[1]</sup>。相比陆上风电, 海上风电具有风速较高、风频稳定、切变小、资源丰富、不占土地、适宜大规模开发等特点, 且近海风电靠近经济发达地区, 距离电力负荷中心近, 电力消纳能力强, 接入和限电问题较少等优点, 受到许多国家关注。目前, 全球海上风电总装机容量已突破 8.759 GW, 我国海上风电总装机量达到近 660 MW, 海上风电将是未来清洁能源发展的一个重要

组成部分。珠海桂山海上风电场是我国南海首个海上风电场, 位于珠江河口的伶仃洋水域, 处于珠海市万山区青洲、三角岛、大碌岛、细碌岛、大头洲岛与赤滩岛之间的海域。规划装机容量 198 MW, 首期装机容量为 120 MW。

海上风电场建设中, 海洋水文、气候条件和海底地质条件非常复杂, 给风电机组地基基础设计和建设带来诸多技术困难。风机地基基础设计和建造是海上风电场建设的重点之一, 在海上风电的成本构成中, 海上风机基础的相关费用仅次于风机, 约占总投资的 35% 左右, 尤其在深水海域, 其投资成本更高<sup>[2]</sup>。

在珠海桂山海上风电场(后简称桂山工程)设计中, 设计单位对风机基础选型、结构分析等做了大量深入的研究工作, 为工程建设打下坚实的基础。

收稿日期: 2015-07-01

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2014A030310194)

作者简介: 马兆荣(1970), 男, 广东台山人, 教授级高工, 硕士, 主要从事水工结构设计和研究工作(e-mail) mazhaorong@gedi.com.cn。

## 1 风机基础设计

### 1.1 场址海洋水文条件

桂山场址所在海域为南海北部沿岸珠江口,是西北太平洋和南海热带气旋活动和登陆的主要地区之一,场址的水位变化较大,波浪较高,水深介于6~12 m之间的海域,50年重现期的波浪波高达到8.4 m。

### 1.2 场址地质条件

珠海桂山海上风电场近场场区海底地貌形态简单。海底地层自上而下依次为:淤泥层、淤泥质土层、粉质粘土层、粉砂层、粗砂层、粉质粘土层、粉砂层、细砂层、砾砂层、砂质粘性土层、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩、微风化花岗岩层。

本海域由于近场区分布有大大小小多个岛屿,造成海底地层的岩面起伏大,对工程设计造成不利影响,如图1所示。

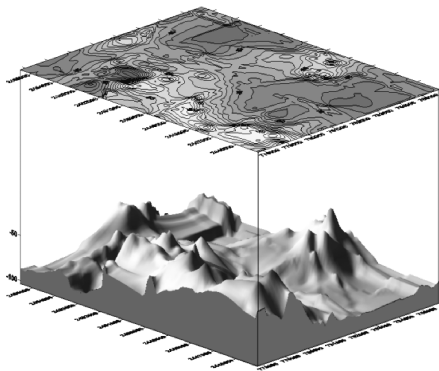


图1 风化花岗岩的反射面三维图

Fig. 1 Three Dimension Picture of Efflorescent Granite's Catopter

### 1.3 设计标准和原则

由于国内暂无海上风电机组基础设计规范,桂山工程在参考国内外本领域及相关领域规范的基础上,结合我国海上风电目前的研究现状,开展研究与设计工作,参考的相关规范有《Design of Offshore Wind Turbine Structures》(DNV-OS-J101)<sup>[3]</sup>,《Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design》(API RP 2A-WSD)<sup>[4]</sup>,《港口工程桩基规范》(JTS 167-4—2012)<sup>[5]</sup>等。

## 2 风机基础结构方案选型

海上风机基础受波浪、海流、风荷载等多种荷

载作用,基础结构设计、施工以及风机安装均受其影响。风机基础设计时,影响风机基础选型的因素包括:海床地质条件、离岸距离、水深、海上风、浪、流、冰等荷载作用以及生态环境的影响等。

鉴于桂山工程淤泥层较厚、风机频率与变形要求高等特点,参考国内外已有的风机基础结构型式,选取水下三桩基础、水上三桩基础、高桩承台基础、四桩导管架基础方案作为桂山工程结构设计比较方案,见图2(a)~(d)。通过开展全面的比选分析,推荐出最适合桂山工程场址的基础型式。

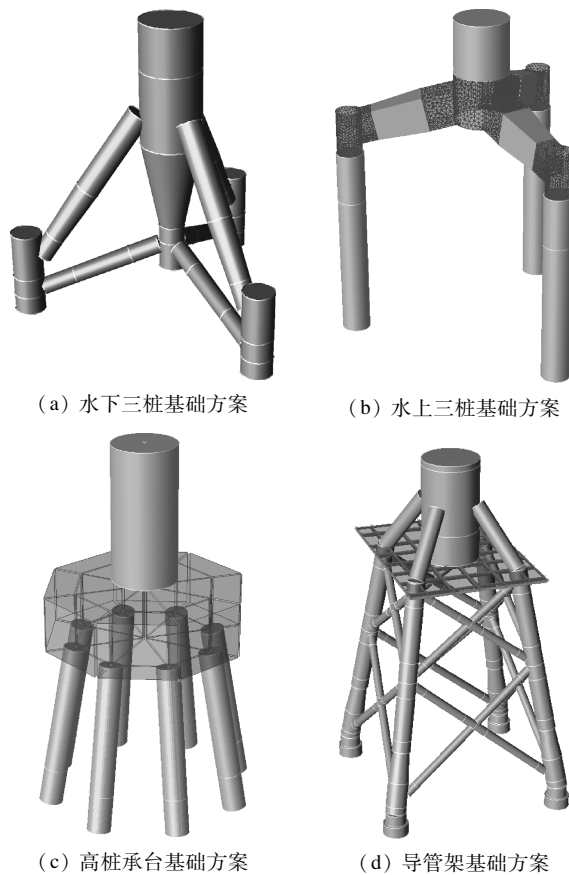


图2 风机基础结构型式

Fig. 2 Foundation Types of Offshore Wind Farm

通过详细的数值分析与比较,4种基础设计方案的名义应力、节点冲切、桩基承载力、桩身应力、转角、疲劳以及结构频率均能够满足设计要求。

通过打桩分析,4种基础的沉桩均是可行的。从施工工艺、施工难点、施工工期、船级设备需求等多方面进行了对比分析,4种基础设计方案均可以实施,各有优缺点。从工程造价、施工风险可控

性以及施工难易程度等方面综合比较,四桩导管架基础方案相比其他基础方案均有一定优势,因此作为推荐基础型式,并作为下一步工作分析的重点。

### 3 基础设计关键技术

#### 3.1 海洋土参数与桩土相互作用

海洋地基土参数对基础结构设计影响较大,而海上钻孔取样及试验对海洋土扰动较大,为了获取更为准确的参数,桂山工程设计时,有机结合海洋土室内试验、导管架基础离心机模型试验、海上试桩试验三种手段,研究海洋土参数及桩—土相互作用机理。

其中,循环动三轴试验以应力控制及应变控制两种方式,选取不同的围压和循环应力幅值组合以及不同的控制应变,研究软粘土的循环累积变形规律,以获得土体在不同条件下的割线刚度与循环加载次数之间的关系,土体在不同固结压力下的循环弱化因子,用于桩基循环累积变形的计算分析。

土工离心模型试验采用相似理论,按一定比例制成试验模型,并将模型置于离心场中,通过施加 $n$ 倍的重力加速度,使模型达到原型相等的应力状态,以此模拟研究原型的变形与破坏<sup>[6]</sup>。

通过试桩试验,能获得详细可靠的承载力参数,对抗压与抗拔承载力进行复核,保证工程设计的安全性,并根据试验结果,为进一步优化桩基设计提供参考。

最终,通过离心机试验与试桩试验,各自得到海洋土与工程桩的 $p$ — $y$ 曲线,并与API规范的 $p$ — $y$ 曲线进行对比,其中离心机模型试验与试桩试验得到的曲线比较吻合。

#### 3.2 风机基础结构耦合分析

海上风机基础大多是桩基础,会受到恶劣的海洋环境与多重荷载作用,真实模拟风机基础的受力,需模拟出符合实际的地基土模型,包含场址区域的海况资料,建立真实的三维有限元模型。

风机基础结构耦合分析的内容包括静力强度分析、变形分析、节点抗冲切分析、模态分析、疲劳分析、地震分析、靠船防撞分析等。

采用SACS建立海上风机基础结构三维模型,通过风机基础结构的耦合分析,结构所有单元和节点的UC值均小于1.0,满足强度设计的要求。风机塔基础法兰面竖向高差能控制在 $\pm 50$  mm范围

内,转角控制也满足小于 $0.25^\circ$ 的要求。地震作用下,结构均能满足强度与韧性要求。靠船防撞分析分正常使用状态与偶然极限状态两种工况,正常使用状态下的分析要保证靠船构件的正常使用,偶然极限状态要保证基础结构的安全性。

#### 3.3 频率窗口问题

海上风机对振动非常敏感,若风机本身的自振频率与支撑结构的频率非常接近,容易引起共振,不仅影响风机正常运行,更可能导致风机及基础的破坏。

风机在运行过程中会承受转子的循环激励,转子的旋转频率通常作为第一激励频率,称为1P。分析中考虑的第二激励频率是叶片通过频率,通常称为2P(两叶片风机)或者3P(三叶片风机),即两倍或三倍于1P频率。以两叶片风机为例,为避免产生共振,支撑结构的第一自振频率应避开1P或者2P附近。合理的支撑结构频率区间应在 $1P + 10\% \sim 2P - 10\%$ 之间。

此外,支撑结构与风机的服役时间为25年,支撑结构可能更长一些,在服役期间,支撑结构的长期振动特性是变化的,工程设计过程中,需要研究支撑结构长期振动特性变化,其中局部冲刷<sup>[7]</sup>、海生物附着、桩土循环弱化<sup>[8]</sup>是重点关注的因素。

#### 3.4 疲劳分析

疲劳分析是海上风电场风机基础结构设计的重要内容,也是保证海上风电机组安全运行的关键,同时关系到风机基础的投资成本。

导管架基础结构是由多根钢管组合而成,存在大量节点,而节点焊缝是疲劳的最薄弱区域,往往存在较大的应力集中,在风和波浪的动力循环载荷作用下,管节点处往往因为疲劳破坏而造成结构整体破坏。

桂山工程设计过程中,对基础整体与局部节点开展了大量的数值分析,并对局部位置进行了物理模型试验,其中数值分析根据不同的设计阶段,分别采取了等效疲劳、确定性疲劳、谱疲劳、时程疲劳等多种方法开展分析,其中时程疲劳是所有分析方法中最准确,也是最耗时的。

由于引起基础疲劳的风荷载与浪荷载的频率不同,通过制作系列典型标准圆棒实验模型,分别针对高频、低频、高低双频疲劳荷载施加模式,研究多种荷载耦合作用下评估疲劳损伤的方法,揭示不

同频率对疲劳寿命的影响,同时利用数值模拟手段对不同疲劳荷载叠加方法进行计算,并与试验结果进行对比研究,研究不同荷载耦合作用下的组合方法,并应用到桂山工程中。

最终,采取时程疲劳分析了风机基础的疲劳,所有节点均满足25年的设计寿命使用要求。

### 3.5 防腐设计

因为风机基础是无人居住的,平时维护不多,海上维护成本较高。因此,开发海上风电场,有效的防腐措施是保证风电场运行寿命的关键一环。

海洋腐蚀本质上是一种电化学腐蚀过程,在海洋工程中,不同腐蚀环境区域的腐蚀程度相差很大,腐蚀环境可分为大气区、浪溅区、水下浸没区、全浸区、海泥区等几个区域,各分区需采用不同的防腐蚀设计。

根据国内外海洋工程、港口工程防腐蚀设计经验,结合桂山工程风电场场址区域水环境特点,风机基础采用物理防护与电化学保护的联合保护方式,且考虑预留腐蚀裕量。同时,设计要求对海上风电场钢结构的腐蚀状况及防腐蚀效果应定期进行巡视检查和定期检测。

### 3.6 灌浆设计

风机基础的灌浆连接段由2个同心圆管组成,两个钢管上焊有剪力键,通常剪力键的形状分光圆钢筋与方钢2种,内外钢管之间填充高强灌浆材料构成。灌浆连接段从受力的角度看,它是传力荷载承上启下的唯一部位,从施工的角度看,灌浆施工是承前启后的灌浆工序,因此,基础的灌浆设计至关重要。

灌浆连接段由于承受多重荷载作用,其受力机理复杂,一般而言,灌浆连接段有3种受力机理:浆体与钢管的界面粘结、摩擦以及桩和套管剪力键形成的抗压柱。灌浆连接段的受力分析不仅考虑强度方面,还要分析长期荷载作用下的疲劳。桂山工程采用规范校核与有限元分析相结合,详细分析了灌浆连接段的受力。

桂山工程的基础灌浆属水下灌浆,灌浆施工是不可逆的过程,灌浆连接段的设计不仅要便于灌浆施工,而且还需要考虑施工的安全可靠,多种通道保障灌浆施工的顺利进行。

## 4 结论

珠海桂山海上风电场作为中国南海首个海上风

电场,对我国能源改革以及海洋经济有着重要的推动作用。由于桂山工程海域属于热带气旋多发区域,海床表层淤泥覆盖层非常厚,海底岩层面高低变化很大,风机基础设计过程中开展了多个关键技术的攻关,主要总结如下:

1)结合数值模拟、常重力试验、离心机试验、现场试桩试验等多种方式,对海洋土及桩土相互作用开展研究,确保参数的准确性,研究了桩土相互作用的机理。

2)国内首次在海上风电领域采用SACS建立海上风机基础结构三维模型,开展耦合分析,并研究了风机支撑结构长期振动特性的变化。

3)开展全时域疲劳分析,并研究不同荷载耦合作用下的组合方法,使风机基础的疲劳寿命满足设计要求。

4)首次在国内采用水下灌浆技术,创造性设计具有施工便利与多重施工保障的灌浆连接段结构,通过灌浆连接段的复杂受力,使得灌浆连接段满足强度与疲劳两方面要求。

### 参考文献:

- [1] SAWYER S. Global Wind Markets-onward and Upward. In: Proceedings of European Wind Energy Conference, Track: BUSINESSANDPOLICY TOPIC: Global Policies and Markets. ID: 692. 2010.
- [2] SEIDEL M. Jacket Substructures for The REpower 5M Wind Turbine [C]. Proceedings of European Offshore Wind, 2007.
- [3] DNV-OS-J101. Det Norske Veritas: Offshore Standard, Design of Offshore Wind Turbine Structures [S].
- [4] API RP 2A-WSD. American Petroleum Institute: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design [S]. October, 2007.
- [5] JTS 167-4-2012, 港工工程桩基规范 [S].
- [6] 刘晋超,熊根,朱斌,等. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性 [J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 591-599.
- [7] PRENDERGAST L J, HESTER D, GAVIN K, et al. An Investigation of the Changes in the Natural Frequency of a Pile Affected by Scour [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013(332): 6685-6702.
- [8] LOMBARDI D, BHATTACHARYA S, WOOD D M. Dynamic Soil-structure Interaction of Monopile Supported Wind Turbines in Cohesive Soil [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2013(49): 165-180.

(责任编辑 郑文棠)