

海上浮式风机基础设计综述

王彪¹, 毕涛², 肖志颖³

(1. 中国葛洲坝集团水务运营有限公司, 湖北 武汉 430035 ;

2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610023 ;

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要:文章介绍近年来我国海上风电相关政策, 调研、总结全球浮式风机项目的现状和浮式风机基础结构的相关参数, 对比海上浮式风机不同基础型式的性能, 并分析海上浮式风机基础的研发方向。

关键词:海上浮式风机; 基础设计; 结构型式。

中图分类号: TM614 文献标志码: B 文章编号: 1671-9913(2018)09-0052-06

DOI:10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2018.09.010

Summary of Foundation Design for Offshore Floating Wind Turbine

WANG Biao¹, BI Tao², XIAO Zhi-ying³

(1. China Gezhouba Group Water Operation Co., Ltd., Wuhan 430035, China;

2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610023, China;

3. Power China Kunming Engineering Co., Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: Rapid progress has been made in the advancement of floating offshore wind turbine in recent years. To promote the development of foundation design for the floating offshore wind turbine in China, the policy of offshore wind turbine in China has been introduced, and the current development of international floating wind turbine projects and relevant parameters of the foundation structure are investigated. The performance of different foundations for the floating offshore wind turbine has been studied. The development direction of the foundation structures for the floating offshore wind turbine have been analyzed, which provides reference for the research of floating offshore wind turbine in China.

Key words: floating offshore wind turbine; foundation design; structure type; development status; research direction.

我国海上风能资源丰富, 开发海上风能可优化能源结构、促进经济可持续发展, 对于转变经济发展方式具有重要意义。与陆地风能相比, 海上风能具有诸多优点:(1)风资源丰富, 质量高:离岸10 km的海风风速一般比沿岸陆上风速高20%, 且海风的湍流强度小、主导风向稳定、切变小, 可延长风机寿命, 减小塔架高度;(2)海上风电场毗邻用电中心:我国的电力负荷中心位于东部沿海, 而优质的陆地风能

资源却位于西北, 海上风电场毗邻沿海用电中心, 可大大缩减送电距离;(3)海上风电场远离陆地, 不占用土地资源, 减少了对环境的影响。因此, 发展海上风电可以优化能源结构, 降低送电成本, 减少环境污染, 节约土地资源。

目前海上风机一般采用固定式基础, 该类基础的打桩、建造、运输和吊装的费用昂贵(特别是在超过50 m水深的海域);而浮式风机可

* 收稿日期: 2018-03-28

作者简介: 王彪(1988-), 男, 湖北鄂州人, 工程师, 主要研究海上风机基础。

整体安装和拖航，从而降低建造安装费用。在机组容量越做越大、近岸资源越用越少的情况下，浮式风机将会是海上风电未来发展的重点方向。

1 与海上风电相关的政策

2010年，我国首个大型海上风电项目—上海东海大桥海上风电项目一期全部并网发电，采用固定式桩柱基础，总装机容量102MW，由此

拉开我国大规模建设海上风电的序幕。为加快海上风电行业发展，国家近年来出台了一系列与海上风电规划和建设相关的政策，见表1。《2017年中国风电装机容量简报》显示：至2017年底，我国海上风电累计装机容量为2.79GW。结合表1可知：(1)我国海上风电经过“十二五”期间的发展已初具规模，但目前的进展仍远落后于规划；(2)我国的海上风电有向深远海发展的趋势。因此，亟待研究适合我国海域的风机基础。

表1 近年来我国与海上风机相关的政策

年份	国家部门	规定名称	相关内容
2005	发改委	可再生能源产业发展指导目录	将近海风电机组技术研发列入指导目录
2008	发改委	可再生能源发展“十一五”规划	沿海风电基地准备，近海风电技术研发、试验、设备制造和试点示范
2009	能源局	近海风电场工程规划报告编制办法(试行)、近海风电场工程预可行性研究报告编制办法(试行)	规范近海风电场规划和可行性研究报告编制
2009	能源局	海上风电场工程规划工作大纲	对海上风电场工程规划的工作范围、原则、内容、方法、职责、组织管理等进行规定
2010	工业和信息化部	风电设备制造行业准入标准(征求意见稿)	将海上风电设备产业列入优先发展内容
2010	能源局	国家首期海上风电特许权招标	进行第1批海上风电特许权招标，共计100万kW
2011	能源局、海洋局	海上风电开发建设管理暂行办法实施细则	海上风电场原则上应在离岸距离不少于10km、滩涂宽度超过10km时海域水深不得少于10m的海域布局
2012	能源局	风电发展“十二五”规划	到2015年，我国海上风电装机容量将达到500万kW，2020年底将达到3000万kW
2012	科技部	风力发电科技发展“十二五”专项规划	关键技术包括研究多桩式、悬浮式等不同海上风电机组基础设计技术
2014	能源局	全国海上风电开发建设方案	为推荐海上风电项目建设，提出了若干条有效的措施
2015	能源局	国家能源局关于海上风电项目进展有关情况的通报	提出加快推动海上风电发展的要求和建议
2016	能源局	国家能源局关于印发2016年能源工作指导意见	提出需研究解决制约海上风电发展的技术瓶颈和体制障碍
2016	发改委、能源局	电力发展“十三五”规划(2016-2020年)	到2020年，全国海上风电开工建设规模达到1000万kW，力争累计并网容量达到500万kW以上
2017	发改委、海洋局	全国海洋经济发展“十三五”规划	鼓励在深远海建设离岸式海上风电场，调整风电并网政策，健全海上风电产业技术标准体系和用海标准

2 海上浮式风机的现状

早在1972年，Heronemus就提出了海上浮式风机的概念。经过多年的研究，目前国际上已在概念设计、数值模拟、模型试验和全尺寸样机并网发电等方面取得了一定进展。2008年，Blue H集团安装了世界上第一座试验性浮式风机Blue H。2009年，挪威国家石油公司安装了世界上第一座全尺寸浮式风机Hywind，发电机组的额定功率为2.3MW。2011年，美国研发的WindFloat搭载2MW的风机安装成功。2015年，丸红株式会社和东京

大学等11家单位联合开发的福岛海上浮式风机试点项目并网发电，该项目是世界首个试点浮式风电场，采用了多种浮式基础型式。2017年10月，挪威国家石油公司承建的全球首个浮动式风电场—Hywind Scotland风电场正式并网发电。

目前国际上已有大约40个浮式风机项目正在研发中，本次收集到其中的32个项目，见表2，分析可知：

(1) 目前在研的浮式风机项目主要集中在欧洲、美国和日本，其中，欧洲约占60%。

(2) 浮式风机基础型式主要包括单立柱型(Spar)、半潜式型(Semi-sub)和张力腿型(TLP)和混合型。半潜型基础约占40%；混合型基础通常是结合两种不同类型基础的特点而形成，美国的Nautica AFT、挪威的Sway以及日本的NMRI都是结合了Spar和TLP的特点。

(3) 浮式基础的最小适用水深一般在50 m左右，其中：驳船型基础适用水深最小，最小

为25 m，如日本的Shimizu、瑞典的Hexicon系列；而Spar型基础适用水深最大，最深可达700 m，如挪威的Hywind。

我国对海上浮式风机的研究才刚起步，目前还没有海上浮式风机试点项目安装。但国内高校和科研院所已经做了一些基础研究，在概念设计、数值模拟和水池实验的研究中取得了一定进展。

表2 国际上主要的浮式风机项目

序号	项目名称	所在国家	基础类型	适用水深/m	基础尺寸
1	Blue H	荷兰	TLP	50	—
2	DeepCwind	美国	Semi-sub	—	—
3	DIWET	法国	Floater	—	—
4	GICON	德国	TLP	45	—
5	TriFloater	荷兰	Semi-sub	50	长度76 m，横梁87 m，吃水13.2 m
6	Hexicon	瑞典	Floater	26	H4-24 MW：平台长200 m，宽度480 m，满载吃水15~20 m；
7	HiPRWind	欧盟	Semi-sub	80	1.5 MW：柱中心距35 m，柱高36.5 m；10 MW：柱中心距63 m
8	Hitachi semi-sub	日本	Semi-sub	—	直径64 m，柱高21 m，吃水8 m
9	Iberdrola FLOTTEK	西班牙	TLP	—	—
10	IDEOL	法国	Floater	35	混凝土建造
11	Advanced Spar	日本	Spar	50	长度60 m，连接件高度12 m
12	Kabashima	日本	Spar	100	水下部分37 m
13	Mitsubishi V-shape	日本	Semi-sub	—	排水量约26 000 t，柱直径约14 m，柱高32 m
14	Compact Semi-Sub	日本	Semi-sub	—	宽58 m，柱高32 m
15	Mitsui TLP	日本	TLP	60	柱高35 m，吃水25 m，角柱至中柱距离30 m
16	MODEC	日本	Floater	35	—
17	WinFlo	法国	Semi-sub	50	—
18	NMRI	日本	Spar	—	—
19	Nautica AFT	美国	Spar	—	—
20	Ocean Breeze	英国	TLP	60	平台外径40.5 m，吃水60~200 m，重力式基础44 m×44 m×3.5 m
21	Pelagic	挪威	Floater	—	—
22	Pelastar	美国	TLP	50~200	—
23	Poseidon	丹麦	Floater	40	长度25 m，宽度37 m，高度6 m
24	WindFloat	美国	Semi-sub	50	吃水20 m，系泊4~6根
25	Sea Twirl	瑞典	Spar	—	海平面以下228 m，以上228 m
26	Shimizu	日本	Floater	25	总直径184 m，柱高15 m
27	Hywind	挪威	Spar	120~700	吃水100 m，系泊3根
28	Sway	挪威	Spar	55~400	—
29	INFLOW Technip	法国	Semi-sub	—	—
30	Technip Vertiwind	法国	Semi-sub	50	—
31	Wind Lens	日本	Semi-sub	—	—
32	Windsea	挪威	Semi-sub	25~30	三立柱半潜式，吃水23 m

3 海上浮式风机的基础型式

相对于陆地风机基础，海上风机基础的设计和建造难度更大。风机的正常作业状态对支撑结构的稳定性和结构振动要求严格，而处于海洋环境中的海上风机系统不仅要承受风荷载、波浪荷载、流荷载和冰荷载等环境荷载，而且会产生多种荷载的耦合作用。复杂的荷载和结构型式导致海上风机基础的造价较高，一般占风电场总造价的 20% ~ 30%。因此，风机基础的选型对于海上风电场的建设至关重要。

当前，海上风电场一般建在水深小于 50 m 的浅海区域或潮间带，但当水深超过 50 m，固定式基础（包括重力式基础、单桩基础、三角架基础、导管架基础和群桩承台基础等）的成本过高，此时浮式基础为开发深海海域的风能资源供了一种更经济的选择。因此，近年来国际上提出了多种浮式风机基础的概念设计方案，主要有单立柱型基础（Spar）、半潜式型基础（Semi-sub）和张力腿型基础（TLP）等，见图 1。



图 1 海上浮式风机基础的结构型式

对于主要浮式风机基础的特点，分述如下：

(1) 单立柱型基础包含浮力舱、压载舱和系泊系统。浮力舱提供浮力支撑上部结构，压载舱装水、碎石或高密度混凝土进行压载使系统重心位于浮心之下，由系泊固定其位置，使平台在水中形成“不倒翁”式结构以保证结构的稳定性。单立柱型基础的吃水深，所受垂向波浪激励力小，因此，其垂荡性能好。但单立柱型基础的水线面对稳性的贡献小，其横摇和纵摇运动较大。

(2) 半潜型基础一般由立柱、横梁、压水板

和系泊系统等结构组成。立柱之间通过横梁和斜支撑连接形成整体平台，平台由系泊链固定。立柱内通常分隔成众多舱室，底部一般安装有大直径的压水板以减缓基础的垂荡运动。当基础处于漂浮状态时，较大的水线面积为系统提供足够大的复原力矩，使平台有良好的稳定性。

(3) 张力腿型基础由浮式平台、系泊和上部结构组成。平台由垂直张力腿连接至海底基座模板、吸力沉箱锚或桩基锚，平台的设计浮力大于自身重力，多余的浮力由始终处于张紧状态的张力腿抵消。张紧的系泊能够有效地控制平台的位移，因此，该基础具有良好的垂荡和摇摆运动特性。但系泊系统的安装费用高，且其张力受海流影响大，上部结构和系泊系统的频率耦合易发生共振运动。

(4) 其他型式基础主要有驳船型、混合型等。驳船型基础具有结构大、浮力分布均匀、稳定性好的特点，但对所在海域环境非常敏感。如美国的 NREL/MIT 风机和日本的 NMRI 风机。混合型浮式基础一般由典型浮式风机组合而成，如 Nautica Windpower 公司研发的 AFT 和挪威的 Sway 都是结合了 Spar 和 TLP 浮式基础的特点，见图 2。

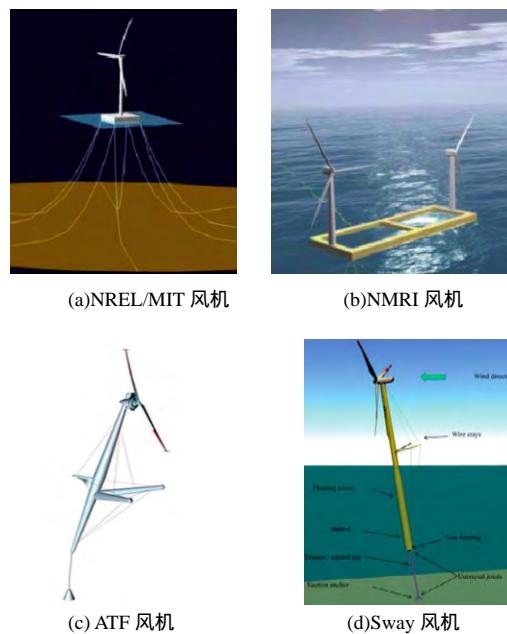


图 2 其他浮式基础概念设计图

不同浮式风机基础的特性对比见表 3。结合表 3 可见：(1) 不同基础的适用水深和运动响

应特性不同，基础选型时要结合具体的水深和海况条件选择合适的基础；(2) 半潜型基础的适用水深范围广、稳定性好、建造安装方便，其

设计和建造可借鉴石油平台和船舶的经验，可作为我国现阶段的重点研发对象。

不同浮式风机基础的特性对比见表 3。

表 3 不同浮式风机基础特性对比

基础型式	通常适用水深	定位	优点	缺点
单立柱型	100 m	系泊	基础吃水深、垂向波浪力小、垂荡性能好	水线面面积小导致横摇和纵摇运动响应较大，安装尺寸大，制造比较困难，不方便移动且成本高
半潜型	50 m	系泊	稳定性好、运行可靠、建造安装方便、适宜水深范围广	结构尺寸较大，波浪荷载及运动响应较大
张力腿型	50 m	张力腿	稳定性较好、对波浪力的动响应小	张力腿的张力随潮汐而改变，容易与基础发生耦合作用，系泊系统复杂且造价高

4 海上浮式风机基础的研发方向

中国的海上风电已经起步，且建设规模迅速增大，但是海上风机基础的结构设计和建造依然有很多亟待研发解决的难点，比如：如何选择浮式风机的基础型式，如何优化浮式风机平台的设计方案，如何制定浮式风机基础的结构设计和施工工艺方面的标准与规范等。为此，分析总结了以下几个研发方向：

(1) 创新概念设计方案，研究不同类型基础的适用性。目前，提出了浮式平台方案基本是参考石油平台的设计。但海上风机系统属于高耸结构，所受气动荷载与波浪的量级相当，其受力比石油平台更复杂，因此，有必要专门研究浮式风机平台的概念设计方案。

(2) 探索新型材料建造海上浮式风机的技术可行性和经济合理性。高成本仍然是制约海上浮式风机大规模应用的根本原因，采用新材料建造浮式平台和塔架可减少建造和安装的成本。

(3) 基于全寿命成本优化浮式基础的结构设计。以浮式风机系统的全寿命成本最小为目标，以稳定性、水动力性能和强度等性能作为约束条件，综合考虑建造、安装和运营维护的全生命周期成本。

(4) 编制海上浮式风机结构设计规范。目前，海上浮式风机结构设计相关规范基本是参考海洋石油平台的 DNV(挪威船级社，Det Norske Veritas) 和 API(美国石油协会，American Petroleum Institute) 系列规范，但两者的结构形式、功能要求不同，因此，需要专门研究并编制海上浮式风机的结构设计规范。

5 结论

(1) 我国海上风电开发有向深远海发展的趋势，迫切需要研发适合我国不同海域的风机基础，半潜型基础适用水深范围广，可作为我国目前阶段的重点研发对象。

(2) 海上浮式风机的设计、建造、安装和运营维护在技术上已经可行，但高昂的成本制约了其大规模应用，尚需在技术和成本上进一步优化。

(3) 海上浮式风机基础的重点研发方向包括创新浮式基础的概念设计方案、探索新型材料建造浮式平台的可行性和经济性以及基于全寿命成本的结构优化设计等。

参考文献：

- [1] 中国可再生能源学会风能专业委员会，中国农业机械工业协会风力机械分会，国家可再生能源中心 . 2017 年中国风电装机容量统计简报 [R] . (2018-04-03)[2018-08-22] . <http://www.cweea.com/html/hangyeshuju1/201804/09-49975.html> .
- [2] HERONEMUS W E .. Pollution-free energy from offshore winds[C]// Proceedings of the 8th Annual Conference and Exposition by Marine Technology Society . Washington D. C ., USA , 1972 :11-13 .
- [3] 高伟，李春，叶舟 . 深海漂浮式风力机研究及最新进展 [J] . 中国工程科学，2014 , 16(2) .
- [4] LIU Yi-chao , LI Sun-wei , YI Qian , et al . Developments in semi-submersible floating foundations supporting wind turbines :a comprehensive review[J] . Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2016 , 60 .
- [5] ARAPOGIANNI A , GENACHTE A , OCHAGAVIA R M , et al . Deep water-the next step for offshore wind energy[R] . Brussels , Belgium :European Wind Energy Association , 2013 .

- [6] 张亮 , 邓慧静 . 浮式风机半潜平台稳定性数值分析 [J] . 应用科技 , 2011 , 38(10) .
- [7] 唐友刚 , 桂龙 , 曹菡 , 等 . 海上风机半潜式基础概念设计与水动力性能分析 [J] . 哈尔滨工程大学学报 , 2014 , 35(11) .
- [8] 邓露 , 王彪 , 肖志颖 , 等 . 钢筋混凝土浮式风机平台概念设计与性能研究 [J] . 华中科技大学学报 (自然科学版) , 2016 , 44(1) .
- [9] 陈达 , 等 . 海上风电机组基础结构 [M] . 北京 : 中国水利水电出版社 , 2014 .
- [10] HENDERSON A R, WITCHER D . Floating offshore wind energy-a review of the current status and an assessment of the prospects[J] . Wind Engineering , 2010 , 34(1) .
- [11] WANG CM , UTSUNOMIYAT, WEESC , et al . Research
- on floating wind turbines :a literature survey[J] . The IES Journal Part A :Civil & Structural Engineering , 2010 , 3(4) .
- [12] THIAGARAJAN K P, DAGHER H J . A review of floating platform concepts for offshore wind energy generation[J] . Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering , 2014 , 136 .
- [13] 张婷 . 我国海上风电发展制约性因素分析 [J] . 风能 , 2013 , (2) .
- [14] 于海江 . 制约海上风电发展两大瓶颈—成本和技术 [N] . 中国电力报 , 2015-09-25 .
- [15] MADJID KARIMIRAD . Offshore energy structure for wind power, wave energy and hybrid marine platforms[M] . Switzerland :Springer , 2014 .

(上接第10页)

《火力发电厂焊接接头相控阵超声检测技术规程》(DL/T1718 - 2017) 行业标准中 , 给出了楔块角度的实测值和标称值的偏差范围为 - 2° ~ 2° , 超出此范围应更换楔块 , 在实际检测过程中 , 每次检测工作开始之前 , 都应对楔块的角度进行测量 , 测量方法可参考本文中的试块测定方法 , 目前 , M2M 相控阵仪器具有楔块的磨损校准功能 , 但是功

能还不完善 , 测定的数值需要采用试块进一步校验。

参考文献 :

- [1] 刘晓睿 , 等 . 加楔块的超声相控阵的聚焦特性测试 . 2012 远东无损检测新技术论坛论文精选 [C] . 2012 .
- [2] 姜学平 , 等 . 相控阵超声检测声场近场区长度的理论 [J] . 无损检测 , 2017 , 39(10) .

(上接第51页)

参考文献 :

- [1] 刘宝碇 , 赵瑞清 , 王钢 . 不确定规划及应用 [M] . 北京 : 清华大学出版社 , 2003 .
- [2] SILVA M L D , RIBEIRO S M P , ARIENTI V L , et al . Probabilistic load flow techniques applied to power system expansion planning[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1990 , 5(4) .
- [3] 张立波 , 程浩忠 , 曾平良 . 基于不确定理论的输电网规划 [J] . 电力系统自动化 , 2016 , 40(16) .
- [4] 徐卫民 , 张星琳 , 孔新红 . 三种计算风速威布尔分布参数的比较 [J] . 江西电力 , 2007 , 31(1) .
- [5] ABOUZAHIR I , RAMAKUMAR R . An approach to assess the performance of utility - interactive photovoltaic systems[J] . IEEE Transactions on Energy Conversion , 1993 , 8(2) .
- [6] CHARYTONIUK V , CHEN M S , KOTAS P . Demand forecasting in power distribution system using nonparametric probability density estimation[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1999 , 14(4) .