

# 漂浮式海上大型风力机研究进展

段磊<sup>①②③</sup>, 李晔<sup>①②③\*</sup>

① 上海交通大学, 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

② 上海交通大学, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240;

③ 上海交通大学, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

\*联系人, E-mail: [ye.li@sjtu.edu.cn](mailto:ye.li@sjtu.edu.cn)

收稿日期: 2016-06-01; 接受日期: 2016-08-09; 网络出版日期: 2016-11-01

“青年千人计划”科研启动经费、中国博士后科学基金面上资助项目(编号: 2016M591679)、国家自然科学基金面上项目(编号: 51479114)和海洋可再生能源专项资金项目(编号: GHME2014ZC01)资助

**摘要** 海上风力发电正在向距岸更远、水深更深的海域发展。适用于近海/近岸深水海域(水深>50 m)的漂浮式海上风力机是未来海上风力发电的发展方向, 并已经成为当今世界风电领域和海洋工程领域的研究热点之一。我国在漂浮式海上风力机领域起步稍晚, 发展迅速, 但距离世界先进水平尚有一段距离。为促进我国漂浮式海上风力机的发展, 本文首先回顾了国外漂浮式海上风力机的发展历程和主流技术形式, 继而简述了国外漂浮式海上风力机兆瓦级全尺寸样机的海试工作, 并从研究角度就设计要求、数值仿真和实验室试验三个方面讨论了漂浮式海上风力机的技术与挑战, 最后简介了我国漂浮式海上风力机的发展现状, 并讨论了在环境条件限制下, 我国发展漂浮式海上大型风力机的问题与解决方案。

**关键词** 漂浮式海上风力机, 海上风力发电, 风力发电

**PACS:** 88.50.-k, 88.50.G-, 88.50.gg, 88.50.gj, 88.50.jp

## 1 引言

新世纪以来, 风能发电在世界范围内迅速发展, 并在可再生能源发电中占据重要地位。风能发电按照其安装位置可分为陆上风电和海上风电。相对陆上风电, 海上风电在风资源、风电场位置、风力机装机容量、风电输送等方面具有优势, 在风力机复杂度、全寿命周期成本等方面存在劣势。综合考虑后, 海上风电的利大于弊, 具有开发价值, 特别是对部分陆地面积狭小、海洋面积广阔且风资源丰富的国家和地区

具有很强的吸引力。因此, 在过去的5年中, 海上风电的装机容量迅速增长, 如图1所示<sup>[1]</sup>。

目前, 海上风电多集中在距岸小于30 km、水深小于50 m的近岸浅水海域, 使用固定式海上风力机, 常见的基础形式有单桩式、多桩式、重力式、负压筒式和导管架式等。但是, 近岸浅水海域的海上风电不能满足部分国家的需求。例如, 英国目前正大力发展海上风电, 但随着海上风电场的开发, 近岸浅水海域日趋拥挤, 不足以支撑其实现远期规划目标(至2050年, 海上风电装机容量达到20–55 GW)<sup>[2]</sup>; 再如, 自2011年

**引用格式:** 段磊, 李晔. 漂浮式海上大型风力机研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 124703  
Duan L, Li Y. Progress of recent research and development in floating offshore wind turbines (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 124703, doi: [10.1360/SSPMA2016-00276](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00276)

东日本大地震后, 日本开始发力海上风电, 但受自然条件制约, 近岸浅水海域比较狭窄, 离岸后水深迅速增加, 也不足以支撑其实现远期规划目标(至2050年, 海上风电装机容量达到37 GW)<sup>[3]</sup>.

于是, 这些国家将目光投向了近海/近岸深水海域。相对于近岸浅水海域, 近海/近岸深水海域的风资源更加丰富、优质。但是, 上述固定式海上风力机不适合应用在水深大于50 m的条件下。受海上油气行业由近及远、由浅入深、由固定式到漂浮式的发展过程启发, 漂浮式海上风力机进入人们的视线。

## 2 概述

### 2.1 漂浮式海上风力机的优势

与固定式海上风力机相比, 漂浮式海上风力机在资源、工作条件、生存性和经济性等方面具有优势。

(1) 漂浮式海上风力机所处的深水海域具有更丰富、优质的风资源。以日本海域为例, 其海上风电潜在量约为453 GW, 其中的300 GW分布在水深50–200 m的深水海域<sup>[3]</sup>。

(2) 漂浮式海上风力机具有更好的工作条件。以Hywind漂浮式海上风力机样机为例, 2011年其总发电量为10.1 GWh, 折合满负荷发电4391 h, 利用率超过50%, 高于现有固定式海上风力机均值的40%, 更远高于陆上风力机均值的25%–30%<sup>[4]</sup>。

(3) 漂浮式海上风力机在极端海况下具有更好的

生存性。在台风等超过设计标准的极端海况下, 固定式海上风力机需要完全承载风、浪等环境载荷, 容易遭到破坏; 漂浮式海上风力机可以通过一定范围内的运动降低结构载荷, 从而降低遭到破坏的风险。

(4) 漂浮式海上风力机在深水海域具有更好的经济性。以平准化能源成本为例, 在50 m水深条件下, 漂浮式海上风力机与固定式海上风力机旗鼓相当, 但在大于50 m水深条件下, 漂浮式海上风力机具有显著优势<sup>[2]</sup>。此外, 漂浮式海上风力机尚处于发展初期, 其成本优势还未完全展现。

### 2.2 漂浮式海上风力机的发展历程

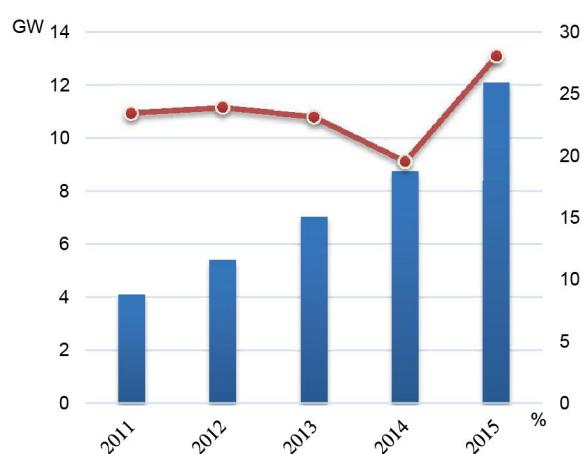
漂浮式海上风力机最早于1972年由美国麻省理工学院的Heronemus<sup>[5]</sup>教授提出, 他将很多小型风力机安装在一个大型浮式平台上, 可以作为漂浮式海上风力机的雏形。进入新世纪以来, 漂浮式海上风力机逐步成为风电领域和海洋工程领域的研究热点, 其中美国、欧洲和日本在本领域居于领先地位, 很多研究所、大学和企业相继投入到漂浮式海上风力机的研发中, 并取得了丰硕的成果, 主要体现在理论研究、数值仿真、水池试验和样机海试等方面。

(1) 美国能源部国家可再生能源实验室<sup>[6,7]</sup>、麻省理工学院<sup>[8–10]</sup>等率先在本领域内展开理论研究。

(2) 美国能源部国家可再生能源实验室、DNV-GL船级社、丹麦国家可持续能源实验室和挪威科技大学等机构开发出数种数值仿真程序, 并组织国际性数值仿真程序比较合作项目OC3<sup>[11]</sup>、OC4<sup>[12]</sup>和OC5。

(3) Statoil ASA公司在Marintec海洋工程水池中对Hywind单柱漂浮式海上风力机进行试验<sup>[13]</sup>; Principle Power公司和Marine Innovation & Technology公司在加州大学伯克利分校船模水池中对WindFloat半潜漂浮式海上风力机进行试验<sup>[14–16]</sup>; 缅因大学在MARIN海洋工程水池中对三种形式的漂浮式海上风力机进行试验<sup>[17,18]</sup>; 日本国立海洋技术研究所在其海洋结构水池中对单柱漂浮式海上风力机进行试验<sup>[19]</sup>; IDEOL公司在OCEANIDE海洋工程水池中对Damping Pool半潜漂浮式海上风力机进行试验<sup>[20]</sup>; GICON公司在汉堡船模水池中对GICON-TLP张力腿漂浮式海上风力机进行试验<sup>[21]</sup>。

(4) 挪威Hywind、美国/葡萄牙WindFloat、日本Goto-FOWT和Fukushima-Forward等项目已经进行全



**图1** (网络版彩图)近年海上风电累计装机容量及增长率  
**Figure 1** (Color online) Global accumulative capacity and growth rate of offshore wind energy.

尺寸样机海试、并网发电,代表目前漂浮式海上风力机的最高水平。详情请见本文第3部分。

### 2.3 漂浮式海上风力机的主流技术形式

漂浮式海上风力机与固定式海上风力机最主要的区别在于其漂浮式平台,因此根据平台的类型划分其技术形式,主要分为单柱式、半潜式和张力腿式3种,如图2所示。

单柱式海上风力机的平台优点为结构重量轻,稳定性好,结构简单、连续,易于设计、制造;缺点为安装水深受限(大于100 m),且需要使用重型浮吊等特种装备进行海上装配作业,并无法拖航回港口修理。目前,单柱式海上风力机已经有数台兆瓦级样机投入使用,如Hywind, Goto-FOWT等。

半潜式海上风力机的平台优点为安装水深灵活,且可以进行港口装配作业后拖航至机位点,并可以拖航回港口修理;缺点为重量大,结构复杂,连接部件多,不易于设计、制造,且需要配备昂贵的主动压载系统。目前,半潜式海上风力机也已经有数台兆瓦级样机投入使用,如WindFloat, Fukushima-Forward等。



图2 (网络版彩图)漂浮式海上风力机3种主流技术形式(图片来自于网络, <https://www.dnvg.com/>)

Figure 2 (Color online) Types of floating offshore wind turbines (from the website, <https://www.dnvg.com/>).

**表1** 漂浮式海上风力机兆瓦级全尺寸样机  
**Table 1** Multi-MW prototypes of floating offshore wind turbines

项目名称	国家	浮体类型	风力机类型	功率(MW)
Hywind	挪威	单柱式	水平轴、迎风式	2.3
WindFloat	美国	半潜式	水平轴、迎风式	2
Goto-FOWT	日本	单柱式	水平轴、背风式	2
Fukushima-Forward	日本	半潜式	水平轴、背风式	2
		半潜式	水平轴、迎风式	7

张力腿式海上风力机的平台优点为安装水深灵活,结构重量轻,稳定性好,且可以进行港口装配作业后拖航至机位点;缺点为其锚泊系统的载荷很大,且需要使用特殊设备进行复杂的海上装配作业。目前,张力腿式海上风力机的兆瓦级样机正在规划,尚未投入使用,如Blue H TLP, GICON-TLP等。

除以上3种主流技术形式外,近年还出现一些特殊的漂浮式海上风力机设计方案,或在一个漂浮式平台上安装多台风力发电机,如FORCE Technology公司的WindSea方案(<http://www.windesa.com>);或在一个漂浮式平台上同时安装风力发电机和其他海洋能发电装备,如MODEC公司的SKWID方案(<http://www.modec.com>)。

### 3 漂浮式海上风力机的全尺寸样机海试

截至目前,数个漂浮式海上风力机项目已经制成兆瓦级全尺寸样机,并成功实施海试和并网发电,代表着当前漂浮式海上风力机的最高水平,包括Hywind, WindFloat, Goto-FOWT和Fukushima-Forward项目,如表1所示。此外,Damping Pool, GICON-TLP等项目的漂浮式海上风力机也有望在近两年内制成兆瓦级全尺寸样机,开始海试。

#### 3.1 Hywind项目

Hywind漂浮式海上风力机由Statoil ASA公司等研发,采用单柱式设计,配备1台西门子SWT-2.3-82型风力机,于2009年在挪威海域建成并投入使用,如图3所示。Hywind是世界第一台兆瓦级漂浮式海上风力机全尺寸样机。截至2014年5月,其累计发电量超过50 GWh,平均发电功率为其装机功率的41.4%。2015年,Statoil ASA与苏格兰政府签订协议,将基于Hywind技术于2017年在苏格兰建成世界首个漂浮式海上风电场,装机容量为30 MW,由5台6 MW漂浮式海上风力机组组成(<http://www.statoil.com>)。



图3 (网络版彩图)Hywind项目漂浮式海上风力机(图片来自于网络, <http://www.offshorewindindustry.com/>)

Figure 3 (Color online) The floating offshore wind turbine of Hywind project (from the website, <http://www.offshorewindindustry.com/>).

### 3.2 WindFloat项目

WindFloat漂浮式海上风力机由美国Principle Power公司等研发,采用半潜式设计,配备1台维斯塔斯V80-2.0MW型风力机,于2011年在葡萄牙海域建成并投入使用,如图4所示。WindFloat是世界第一台兆瓦级半潜式海上风力机全尺寸样机。截至2014年1月,其累计发电量超过16 GWh。未来五至十年中,Principle Power公司拟基于WindFloat技术在美国建设WindFloat Pacific海上风电场,装机容量为30 MW;在葡萄牙建设WindFloat Atlantic海上风电场,装机容量为25 MW (<http://principlepowerinc.com/>)。

### 3.3 Goto-FOWT项目

Goto-FOWT漂浮式海上风力机由日本数家企业、大学、研究所等合作研发,采用单柱式设计,配备1台富士重工Subaru 80/2.0型风力机,于2013年在长崎县海域建成并投入海试,如图5所示,并于2015年完成海试后拆除。受连接电网负荷限制,Goto-FOWT在海试期间将其发电功率限制在600 kW。2016年,Goto-FOWT将被移交地方政府,重新安装并连接该地方主电网,完成后可实现满功率并网发电 (<http://goto-fowt.go.jp/>)。

### 3.4 Fukushima-Forward项目

Fukushima-Forward项目同样由日本数家企业、大学、研究所等合作研发,分为两个阶段。第一阶段1台漂浮式海上风力机采用半潜式设计,配备1台富士重工Subaru 80/2.0型风力机,于2013年末在福岛县海域建成并投入运行,如图6所示。第二阶段2台漂浮式海



图4 (网络版彩图)WindFloat项目漂浮式海上风力机(图片来自于网络, <http://en.wikipedia.org/>)

Figure 4 (Color online) The floating offshore wind turbine of WindFloat project (from the website, <http://en.wikipedia.org/>).



图5 (网络版彩图)Goto-FOWT项目漂浮式海上风力机

Figure 5 (Color online) The floating offshore wind turbine of Goto-FOWT project.



图6 (网络版彩图)Fukushima-Forward项目第一阶段漂浮式海上风力机(图片来自于网络, <http://fukushima-diary.com/>)

Figure 6 (Color online) The floating offshore wind turbine of Fukushima-Forward project phase 1 (from the website, <http://fukushima-diary.com/>).

上风力机分别采用半潜式设计和先进单柱式设计,前者配备1台三菱重工MHI 7MW SeaAngel型风力机,于2015年末在福岛县海域建成并投入试运行,是世界最大的漂浮式海上风力机,如图7所示;后者配备1台日立HTW 5.0-126型风力机,拟于2016年内建成(<http://www.fukushima-forward.jp/>).

## 4 漂浮式海上风力机的技术与挑战

漂浮式海上风力机技术主要参考固定式海上风力机技术和海洋工程平台技术。漂浮式海上风力机虽已经有数台兆瓦级全尺寸样机成功案例,但技术尚未成熟。本文仅就水平轴漂浮式海上风力机的技术特点,从力学角度对其整体设计、数值仿真和实验室试验3个方面进行讨论。

### 4.1 整体设计

通常,海上风力机的设计由风力发电机(塔底基座以上部分)设计和平台(塔底基座以下部分)设计两部分组成。

(1)风力发电机。漂浮式海上风力机的风力发电机与固定式海上风力机相似,主要包括塔架、短舱、叶轮等结构和发电机、齿轮箱等设备。但是,相对于固定式海上风力机固定于海床或滩涂,漂浮式海上风力机受风、浪、流等环境载荷的联合作用,始终呈不平衡受力、不规则运动状态,其结构和设备可能受载变形,特别是传动系统可能会受载大幅变形,因此其结



**图7** (网络版彩图)Fukushima-Forward项目第二阶段漂浮式海上风力机(图片来自于网络, <http://www.offshorewind.biz/>)  
**Figure 7** (Color online) The floating offshore wind turbine of Fukushima-Forward project phase 2 (from the website, <http://www.offshorewind.biz/>).

构、设备需要更高的强度和安全裕度,特别是轴系、齿轮箱等需要更高的强度和对中裕度,同时各设备均需要更严格的固定。

(2)漂浮式平台。漂浮式海上风力机的漂浮式平台与海洋工程平台类似,主要包括浮体和锚泊系统。但是,相对于海洋工程平台主要设备重量较轻、重心位置较低,其上部安装的风力发电机重量大、重心位置高,将大幅提高系统整体的重心,因此需要其具有更好的稳定性;相对于海洋工程平台主要受浪、流等海洋环境载荷作用,其上部安装的风力发电机在工作时会产生巨大的推力,因此其需要更高的抗倾覆能力。同时,漂浮式海上风力机的漂浮式平台在运行水深、结构尺度和载荷等方面与海洋工程平台存在明显的差异,不能简单沿用其经验。

综上,与固定式海上风力机相比,漂浮式海上风力机的风力发电机与漂浮式平台具有更强的耦合作用和相互影响。近年, DNV-GL船级社提出针对固定式海上风力机的“一体化”设计策略,即将固定式海上风力机的风力发电机及其支撑基础作为整体考虑。虽然该策略最初以节约成本为目的,但无疑为漂浮式海上风力机指明了方向——将风力发电机和漂浮式平台作为整体进行设计。部分机构和学者对此已有响应:在传统变速-变桨控制策略的基础上,为漂浮式海上风力机设计了新的控制策略,通过控制叶轮转速和叶片桨距角,以牺牲少量发电功率为代价换取漂浮式平台结构载荷和运动的大幅降低。此外,相对于固定式海上风力机工作于近岸浅水或滩涂海域,漂浮式海上风力机工作于近海/近岸深水海域,将处于更恶劣的海洋环境中,并面对更极端的天气和海况,因此其结构和设备需要更高的可靠性、耐腐蚀性和生存性。因此,亟须开发一种先进的设计方法,能够全面考虑环境、载荷、运动等特征,并将风力发电机、漂浮式平台等作为整体统一筹划,以设计出更经济、安全的漂浮式海上风力机。

### 4.2 数值仿真

如前所述,很多机构为漂浮式海上风力机开发了数值仿真程序,如表2所示<sup>[22]</sup>。数值仿真的结果既可以校核设计方案、又可以指导实验室试验,因此具有重要意义。常见的数值仿真程序多由固定式陆上/海上风力机的数值仿真程序发展而来,本文仅就其水动力

**表 2** 漂浮式海上风力机数值仿真程序<sup>a)</sup>**Table 2** Numerical simulation programs for floating offshore wind turbines

程序名称	空气	水	结构	锚泊
ADAMS+AeroDyn	BEM, GDW+DS	Airy, UD, Str.+ME	SS: FSS WT: MBS	FEM/Dyn
Bladed	BEM GDW+DS	Airy, UD, Str.+ME	SS: FSS WT: Modal + MBS	QS
FAST	BEM GDW+DS	Airy +ME	SS: RSS WT: Modal + MBS	QS
HAWC2	BEM GDW+DS	Airy, Str.+ME	SS: FSS WT: FEM + MBS	FEM/Dyn
Simo/Riflex/AeroDyn	BEM GDW+DS	Airy, UD	SS: RSS WT: FEM + MBS	FEM/Dyn

a) Airy (Airy theory)-艾里波浪理论; DS (Dynamic Stall)-动态失速; Dyn (Dynamic)动态方法; FEM (Finite-Element Method)-有限元方法; FSS (Flexible Substructure)-柔性平台; MBS (Multi-Body Dynamics)-多刚体动力学; ME (Morison's Equation)-莫里森公式; Modal (Modal Superposition)-模态叠加; QS (Quasi-Static)-准静态方法; RSS (Rigid Substructure)-刚性平台; SS (Sub Structure)-平台; Str. (Dean's Stream Function)-流函数波浪理论; UD (User Defined)-用户自定义; WT (Wind Turbine)-风力机

学、空气动力学、结构动力学和锚泊动力学部分进行讨论.

(1) 水动力学模块. 大多数现有数值仿真的水动力学部分或以线性波浪理论和经典线性水动力学理论为基础, 或以莫里森方程(Morison Equation)为基础, 或将上述两种方法结合并加以改进. 但是, 这3种方法均存在一定问题. 第一种方法基于线性理论和小角度假设, 将漂浮式平台的水动力学分解为静水力、绕射力和辐射力, 并调用WAMIT等水动力学求解软件的频域结果, 进行时域分析. 因此, 其忽略以黏性阻尼为代表的二阶及高阶载荷, 同时无法精确求解漂浮式平台的大角度运动问题. 第二种方法基于经验公式, 将漂浮式平台的水动力学分解为附加质量力和阻尼力, 进行时域分析. 因此, 其忽略以绕射力为代表的部分载荷, 并严重依赖附加质量系数和阻尼系数的计算, 而复杂浮体的阻尼系数很难精确求得. 第三种方法基于线性叠加理论, 将上述两种方法合并, 即在由经典线性水动力学理论求得的线性力上添加莫里森方程求得的阻尼力及其他可能的二阶载荷, 进行时域分析. 因此, 虽然其解决了上述两种方法的部分问题, 但是仍然无法精确求解漂浮式平台的大角度运动问题, 并严重依赖阻尼系数的计算.

(2) 空气动力学模块. 大多数现有数值仿真的空气动力学部分或以叶素-动量(Blade Element Mo-

mentum, BEM)理论为基础, 或以动态尾流(Generalized Dynamic Wake, GDW)模型为基础. 同样, 这两种方法也存在一定问题, 无法精确求解漂浮式海上风力机的空气动力学问题. 如前所述, 漂浮式海上风力机受风、浪、流等环境载荷的联合作用, 始终呈不规则运动状态, 会导致上述两种方法失效: 一方面, 当漂浮式海上风力机的叶轮受平台运动影响运动至其尾迹中时, 将彻底违背BEM理论的基础——动量守恒; 另一方面, 当漂浮式海上风力机顺风运动且风速较小时, 将违背GDW模型的假设——诱导风速远小于自由风速. 同时, 这两种方法均不能对叶轮的尾迹场做出准确的分析.

(3) 结构动力学模块. 现有数值仿真的结构动力学部分或以多刚体动力学和模态叠加方法为基础, 或以多刚体动力学和有限元方法为基础. 这两种方法均为计算结构响应的普适方法, 前者计算速度快, 后者计算精度高.

(4) 锚泊动力学模块. 现有数值仿真的锚泊动力学部分或以线性假设为基础, 将锚链的张力简化为回复力矩阵与位移的乘积; 或以准静态假设为基础, 将锚链离散成数段, 并使用悬链线方程计算每一时刻下各锚链段的静态张力; 或直接求解锚链的离散动力学方程. 前两种方法不能准确描述锚泊系统, 特别是在恶劣海况下的动态响应和载荷. 第三种方法计算精

度高, 同时计算时间长.

综上, 现有数值仿真存在一定的问题, 部分学者已经着手改进. 例如, 有学者使用计算流体力学方法研究水动力学和空气动力学问题<sup>[23]</sup>; 有学者使用自由涡尾迹(Free Vortex Wake)方法研究空气动力学问题<sup>[24,25]</sup>. 目前, 大多数学者将漂浮式海上风力机的动力学问题分解为水动力学、空气动力学、结构动力学、锚泊动力学问题, 分别进行计算, 再将某模块的计算结果作为其他模块的边界条件进行迭代求解, 可以认为是“弱耦合”的计算. 但是, 漂浮式海上风力机作为一个整体系统, 各部分对其他部分均具有一定的作用. 例如, 有学者证明漂浮式平台的水动力学响应对风力发电机的空气动力学特性具有很强的影响, 在某些条件下, 将导致各种算法的结果存在较大的差异<sup>[23,26,27]</sup>. 因此, 亟须研发更先进的数值仿真程序, 能够准确对各个模块进行求解, 并能够将两个或数个模块的方程联立, 进行“强耦合”计算求解, 以更准确地描述漂浮式海上风力机整机的动态响应和特性.

### 4.3 实验室试验

如前所述, 数个机构已经对漂浮式海上风力机进行了实验室试验. 相对于数值仿真, 实验室试验的结果更加真实、可信, 可以帮助设计研究人员了解力学特性, 发现设计缺陷, 校准数值仿真程序等, 因此能够做出巨大贡献.

现有漂浮式海上风力机的水池试验均使用世界著名的海洋工程水池, 基于海洋工程领域的相似性准则实施. 海洋工程水池通常使用造波板造浪, 使用循环泵造流, 造浪、造流能力较强, 不仅能够模拟理想情况下的规则波浪、定常流, 还能够模拟真实海况下的不规则波浪和分层流, 可以用于研究漂浮式海上风力机的水动力学、结构动力学和锚泊动力学特性. 同时, 海洋工程水池通常使用风扇矩阵造风, 造风能力稍弱, 虽既能够模拟理想情况下的定常风, 又能够模拟真实海况下的风谱风, 但品质略差, 不足以用于研究漂浮式海上风力机的空气动力学特性, 而仅为研究其水动力学、结构动力学、锚泊动力学特性提供空气动力学载荷.

综上, 现有水池试验尚有一定的不足, 部分学者正在寻找改进方案. 例如, 有学者转换思路, 将风力发

电机放在可模拟漂浮式平台动态特性的运动机构上, 使用风洞对其空气动力学特性进行研究, 但无法同时研究其水动力学特性. 因此, 亟须发展更先进的实验方法, 能够准确模拟各种环境载荷, 并将漂浮式海上风力机作为整体进行实验室试验, 以真实地展现漂浮式海上风力机的各种耦合力学特性.

## 5 我国漂浮式海上风力机的发展与挑战

### 5.1 发展现状

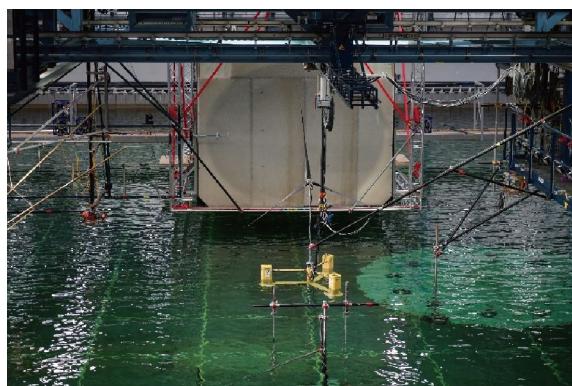
我国在漂浮式海上风力机领域虽起步稍晚, 但部分企业、院校、科研机构已迅速投入对漂浮式海上风力机的研究中, 并取得一定的成果.

在理论研究和数值仿真方面, 天津大学对600 kW漂浮式海上风力机及其半潜式平台进行了动力学耦合分析, 并总结出一套漂浮式海上风力机的耦合建模、计算方法<sup>[28]</sup>; 南京航空航天大学使用自由涡尾迹方法计算漂浮式海上风力机的气动载荷和性能<sup>[29]</sup>, 上海理工大学用动态子结构法解耦思路, 将漂浮式海上风力机分解为“塔架与旋转叶片的非定常气动与柔性结构耦合问题子系统”和“风力机-平台-系泊系统结构与水动力耦合问题子系统”, 再进行计算分析<sup>[30]</sup>; 中国科学院力学研究所<sup>[31]</sup>、工程热物理研究所<sup>[32]</sup>、哈尔滨工程大学<sup>[33]</sup>、大连理工大学<sup>[34]</sup>也分别就漂浮式海上风力机进行了展望和研究. 此外, 笔者所在上海交通大学海上新能源团队也对漂浮式海上风力机进行了一些研究, 包括开发数值仿真程序、设计控制策略等<sup>[35-37]</sup>, 并在荷兰MARIN海洋工程水池对漂浮式海上风力机样机模型进行了联合实验室试验<sup>[38]</sup>, 如图8所示.

### 5.2 问题与解决方案

我国在发展漂浮式海上风力机的过程中可能面对各类问题, 本文仅就站址选择和极端天气等环境因素的制约进行简要讨论.

我国渤海、黄海、东海海域水深较浅: 渤海海域平均水深为18 m; 黄海海域平均水深为44 m; 东海海域平均水深为349 m, 但其大陆架海域平均水深仅为72 m. 出于发电装备成本考虑, 渤海、黄海和东海大部海域均不适合漂浮式海上风力机. 我国南海海域水深较深, 幅员辽阔, 且大部海域远离大陆. 出于发电装



**图 8** (网络版彩图)6 MW漂浮式海上风力机模型水池试验  
**Figure 8** (Color online) Model test of 6 MW floating offshore wind turbine.

备和输变电装备成本考虑,南海大部海域同样不适合漂浮式海上风力机。从风电场选址方面考虑,我国仅有福建、广东、广西、海南和台湾五省沿岸的部分海域适合使用漂浮式海上风力机发展海上风电场,但上述海域是世界著名的台风高发区域,常有台风、强台风甚至超强台风过境或登陆,将严重威胁漂浮式海上风力机的安全和生存。综上,我国发展漂浮式海上风力机将面临环境因素的巨大挑战。

针对极端天气的问题,需要在理论研究、数值仿真、实验室试验中对漂浮式海上风力机的运动与恶劣海况之间的强非线性相互作用予以充分关注,以高

精度地预报漂浮式海上风力机在极端天气下的结构载荷和动态特性,再根据目标机位点的气象、水文统计数据对漂浮式海上风力机进行有针对性的优化设计,以提高其在极端天气下的安全性和生存性。针对站址选择问题,可以开拓思路:一方面,考虑在远离大陆的岛屿附近海域布置少量漂浮式海上风力机,与潮流能<sup>[39,40]</sup>、波浪能<sup>[41,42]</sup>等其他海洋可再生能源发电装备及传统柴油发电机组组成独立微型电网,为岛屿居民供电<sup>[43–45]</sup>,另一方面,考虑在友好国家的合适海域建设使用漂浮式海上风力机的海上风电场,连接该国家的主电网,为陆地居民供电。

## 6 结语

过去十年,漂浮式海上风力机完成了从无到有、从模型到样机的过程,目前正处于从示范到应用,从单机到电场的进程中,未来将向更大、更远、更深发展。我国在漂浮式海上风力机领域起步稍晚,目前正处于理论研究、数值仿真和实验室试验阶段,距以兆瓦级全尺寸样机海试为代表的世界先进水平尚有较长的距离。面对如此情况,笔者谨希望本文能够引起更多国内研究机构和企业对漂浮式海上风力机的兴趣,致力于漂浮式海上风力机的研发,跟进、追赶、超越世界先进水平,形成具有自主知识产权的新兴绿色产业。

## 参考文献

- 1 Sawyer S, Fried L, Shukla S, et al. Global wind report annual market update 2015. Technical Report. Brussels: Global Wind Energy Council, 2016
- 2 James R, Ros M C. Floating offshore wind: Market and technology review. Technical Report. London: Carbon Trust, 2015
- 3 Hanaoka T. Wind power energy resources and mid/long term target V4.3 (in Japanese). *Wind Energy*, 2015, 39: 42–45 [2015, 39(1): 42–45]
- 4 Skaare B, Nielsen F G, Hanson T D, et al. Analysis of measurements and simulations from the Hywind Demo floating wind turbine. *Wind Energ*, 2015, 18: 1105–1122
- 5 Heronemus W E. Pollution-Free Energy from the Offshore Winds. Washington D C: Marine Technology Society, 1972
- 6 Jonkman J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine. Technical Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2007
- 7 Jonkman J M, Matha D. Dynamics of offshore floating wind turbines-analysis of three concepts. *Wind Energy*, 2011, 14: 557–569
- 8 Lee K H. Responses of Floating Wind Turbines to Wind and Wave Excitation. Dissertation for Master's Degree. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2005
- 9 Wayman E N. Coupled Dynamics and Economic Analysis of Floating Wind Turbine Systems. Dissertation for Master's Degree. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007
- 10 Withee J E. Fully Coupled Dynamic Analysis of A Floating Wind Turbine System. Dissertation for Doctoral Degree. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004

- 11 Jonkman J, Musial W. Offshore code comparison collaboration (OC3) for IEA wind task 23 offshore wind technology and deployment. Technical Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2010
- 12 Robertson A, Jonkman J, Musial W, et al. Offshore code comparison collaboration, continuation: Phase II results of a floating semisubmersible wind system. Technical Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013
- 13 Nielsen F G, Hansen T D, Skaare B. Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines. In: Proceedings of the ASME 2006 25th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Hamburg: The American Society of Mechanical Engineers, 2006. 671–679
- 14 Roddier D, Cermelli C, Aubault A, et al. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *J Renew Sustain Energy*, 2010, 2: 033104
- 15 Cermelli C, Roddier D, Aubault A. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines—part II: hydrodynamics analysis. In: Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Honolulu: The American Society of Mechanical Engineers, 2009. 135–143
- 16 Roddier D, Cermelli C, Weinstein A. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines—part I: design basis and qualification process. In: Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Honolulu: The American Society of Mechanical Engineers, 2009. 845–853
- 17 Goupee A J, Koo B J, Kimball R W, et al. Experimental comparison of three floating wind turbine concepts. *J Offshore Mech Arct Eng*, 2014, 136: 021903
- 18 Koo B J, Goupee A J, Kimball R W, et al. Model tests for a floating wind turbine on three different floaters. *J Offshore Mech Arct Eng*, 2014, 136: 021904
- 19 Chujo T, Minami Y, Nimura T, et al. Experimental study for SPAR type floating offshore wind turbine with blade-pitch control. In: Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Nantes: The American Society of Mechanical Engineers, 2013. V008T09A034
- 20 Beyer F, Choisnet T, Kretschmer M, et al. Coupled MBS-CFD simulation of the IDEOL floating offshore wind turbine foundation compared to wave tank model test data. In: Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference. Kona: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2015. 367–374
- 21 Hyland T, Adam F, Dahlias F, et al. Towing tests with the GICON-TLP for wind turbines. In: Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference. Busan: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2014. 283–287
- 22 Popkol W, Vorpahl F, Zuga A, et al. Offshore code comparison collaboration continuation (OC4), phase i—results of coupled simulations of an offshore wind turbine with jacket support structure. In: Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2012. 337–346
- 23 Tran T, Kim D, Song J. Computational fluid dynamic analysis of a floating offshore wind turbine experiencing platform pitching motion. *Energies*, 2014, 7: 5011–5026
- 24 Sebastian T. The Aerodynamics and Near Wake of An Offshore Floating Horizontal Axis Wind Turbine. Dissertation for Doctoral Degree. Massachusetts: University of Massachusetts Amherst, 2012
- 25 Qi Q, Barltrop N. Unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines using free vortex wake model. In: Proceedings of the Twenty (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference. Kona: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2015. 576–583
- 26 Tran T T, Kim D H. The aerodynamic interference effects of a floating offshore wind turbine experiencing platform pitching and yawing motions. *J Mech Sci Technol*, 2015, 29: 549–561
- 27 Tran T T, Kim D H. A CFD study into the influence of unsteady aerodynamic interference on wind turbine surge motion. *Renew Energy*, 2016, 90: 204–228
- 28 Zhang R, Tang Y, Hu J, et al. Dynamic response in frequency and time domains of a floating foundation for offshore wind turbines. *Ocean Eng*, 2013, 60: 115–123
- 29 Xu B F, Wang T G, Yuan Y, et al. Unsteady aerodynamic analysis for offshore floating wind turbines under different wind conditions. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Scis*, 2015, 373: 20140080
- 30 Gao W, Li C, Liu Q. The conceptual design and review of aerodynamics-hydrodynamics coupling characteristics of floating offshore wind turbines (in Chinese). *Energy Res Inform*, 2011, 27: 168–173 [高伟, 李春, 刘全. 深海漂浮式风力机的概念设计与气动-水动力耦合特性评述. 能源研究与信息, 2011, 27: 168–173]
- 31 Zhou J F, Lin Y F. Essential mechanics issues of offshore wind power systems. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 1589–1601 [周济福, 林毅峰. 海上风电工程结构与地基的关键力学问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1589–1601]
- 32 Liu Q, Yang K, Huang A W, et al. Study on the dynamic response of floating wind turbines (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2013, 34: 1256–11261 [刘强, 杨科, 黄哀武, 等. 漂浮式风力机动态响应特性研究. 工程热物理学报, 2013, 34: 1256–1261]

- 33 Ye X R, Zhang L, Wu H T, et al. Influence of platform motion response on aerodynamic performance of floating offshore wind turbine (in Chinese). *J Huazhong Univ Sci Technol (Natl Scie Ed)*, 2012, 40: 123–126 [叶小嵘, 张亮, 吴海涛, 等. 平台运动对海上浮式风机的气动性能影响研究. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40: 123–126]
- 34 Ren N X, Li Y G, Ou J P. The fluid-structure interaction analysis of aerodynamic performance of floating offshore wind turbine blade (in Chinese). *Chin J Comput Mech*, 2014, 31: 91–95 [任年鑫, 李玉刚, 欧进萍. 浮式海上风力机叶片气动性能的流固耦合分析. 计算力学学报, 2014, 31: 91–95]
- 35 Duan L, Kajiwara H. A coupled aero-hydrodynamic simulator for offshore floating wind turbines. In: Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. San Francisco: The American Society of Mechanical Engineers. 2014. V09AT09A04
- 36 Duan L, Kajiwara H. A linear parameter-varying controller for offshore floating wind turbines. In: Proceedings of the Eleventh (2014) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Shanghai: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2014. 26–30
- 37 Li Y. Status of large scale wind turbine technology development abroad (in Chinese). *Appl Math Mech*, 2013, 34: 1003–1011 [李晔. 国外大型风力机技术的新进展. 应用数学和力学, 2013, 34: 1003–1011]
- 38 Duan L, Li Y. Report of 1:55 model test of the 6 MW floating offshore wind turbine. Technical Report. Shanghai: Multi-function towing tank of Shanghai Jiao Tong University, 2016 [段磊, 李晔. 6 MW漂浮式海上风力机1:55模型样机水池试验报告. 技术报告. 上海: 上海交通大学多功能拖曳水池实验室, 2016]
- 39 Churchfield M J, Li Y, Moriarty P J. A large-eddy simulation study of wake propagation and power production in an array of tidal-current turbines. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Scis*, 2013, 371: 20120421
- 40 Li Y, Lence B J, Calisal S M. An integrated model for estimating energy cost of a tidal current turbine farm. *Energy Conversion Manage*, 2011, 52: 1677–1687
- 41 Yu Y H, Li Y. Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation of the heave performance of a two-body floating-point absorber wave energy system. *Comp Fluids*, 2013, 73: 104–114
- 42 Falcão A F O. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renew Sustain Energy Rev*, 2010, 14: 899–918
- 43 Magagna D, Uihlein A. Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. *Int J Mar Energy*, 2015, 11: 84–104
- 44 Li Y, Willman L. Feasibility analysis of offshore renewables penetrating local energy systems in remote oceanic areas-A case study of emissions from an electricity system with tidal power in Southern Alaska. *Appl Energy*, 2014, 117: 42–53
- 45 Hammar L, Ehnberg J, Mavume A, et al. Renewable ocean energy in the Western Indian Ocean. *Renew Sustain Energy Rev*, 2012, 16: 4938–4950

## Progress of recent research and development in floating offshore wind turbines

DUAN Lei<sup>1,2,3</sup> & LI Ye<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup> School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

<sup>3</sup> Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Wind energy is playing an important role in the renewable energy sector world-wide. Whilst offshore wind energy is growing rapidly. On one hand, thousands of fixed offshore wind turbines are installed in the shallow water region. On the other hand, use of wind energy is expanding toward the deep sea that may supply greater resource with stronger and more consistent wind, also with less turbulence ambient flow. Compared with fixed offshore wind turbines, those with floating foundation will be more suitable to the deep sea area where water depth is more than 50 m and they are called floating offshore wind turbines. Therefore, floating offshore wind turbines are expected as the future of the offshore wind energy, and have been a research hotspot in the fields of wind energy and ocean engineering. The development of floating offshore wind turbines in China started a little bit later than USA, Europe and Japan, although it has been progressing in recent years. In order to facilitate the development of floating offshore wind turbines in China, the progress of international and domestic research and development are synthesized. First of all, the development process and mainstream types of floating offshore wind turbines are reviewed. Then, the sea tests of multi-MW prototypes of floating offshore wind turbine are introduced, such as Hywind, WindFloat, Goto-FOWT and Fukushima-Forward projects. After that, the technique and challenge in design, numerical simulation and model test of floating offshore wind turbines are discussed from a research standpoint. Finally, the research and development of floating offshore wind turbines in China are presented, also with the challenge and solution of floating offshore wind turbines within the local environmental limitation in China.

**floating offshore wind turbines, offshore wind energy generating, wind energy generating**

**PACS:** 88.50.-k, 88.50.G-, 88.50.gg, 88.50.gj, 88.50.jp

**doi:** [10.1360/SSPMA2016-00276](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00276)