

海上浮式风机气动力-水动力耦合分析研究进展

万德成, 程萍, 黄扬, 艾勇

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 近年来, 海上浮式风机受到了越来越多的关注. 相比陆上风机, 海上浮式风机承载着更加复杂的环境载荷. 本文针对海上浮式风机气动力-水动力耦合分析问题, 对风机的气动力载荷计算、浮式基础的水动力载荷计算, 以及浮式风机系统在风浪流联合作用下的气动力-水动力耦合分析等方面, 分别进行了研究方法及研究现状的介绍, 同时简要分析了海上浮式风机的发展趋势及面临的问题和挑战.

关键词: 海上浮式风机; 气动力分析; 水动力分析; 耦合分析

中图分类号: O353

文献标志码: A 文章编号: 0254-0053(2017)03-0385-23

Overview of Study on Aero- and Hydro-Dynamic Interaction for Floating Offshore Wind Turbines

WAN De-cheng, CHENG Ping, HUANG Yang, AI Yong

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: The floating offshore wind turbine has attracted more and more attention in recent years. But the environmental loads on floating offshore wind turbines have higher level of complexity than those on the traditional onshore or fixed-bottom offshore wind turbines. Besides aerodynamic loads on turbine blades, there are also hydrodynamic loads acting on the support platform. Review on aerodynamic analysis of blades, hydrodynamic simulation of supporting platform, and coupled aero- and hydro- dynamic study on floating offshore wind turbines is conducted. The development trends and challenges of floating offshore wind turbines are also discussed.

Key words: floating offshore wind turbine; aerodynamic loads; hydrodynamic loads; coupled analysis

随着能源危机和环境污染等问题的形势变得日益严峻, 人们越来越重视新型清洁能源的开发. 而风能作为一种清洁、可再生能源, 逐渐成为能源开发领域的研究重点. 风能蕴量巨大, 据统计, 全球的风能约为 $2.74 \times 10^9 \text{MW}$, 其中可利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{MW}$, 比地球上可开发利用的水能总量要大 10 倍. 人类开发利用风能的历史十分悠久, 从公元前 3000 多年利用风帆进行海上航行, 到现代通过海上大型风力发电机组进行风力发电, 风能开发技术日益成熟. 相比于陆上风能, 海上风能储量更大, 分布更广, 风速也更加持久稳定. 同时海上风力发电机比陆上风机有更小的视觉和噪音污染效应, 因此风力发电逐渐从陆地

收稿日期: 2017-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(51379125, 51490675, 11432009, 51579145); 长江学者奖励计划(T2014099); 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022); 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300); 上海市船舶工程重点实验室基金(K2015-11); 工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)

作者简介: 万德成, 教授, 博士. 研究方向: 计算船舶与海洋工程水动力学、多浮体相互作用、流固耦合、波浪载荷、海上新能源装置开发等.

通信作者: 万德成. Email: dcwan@sjtu.edu.cn

走向海洋，从浅海走向深海（图1）。

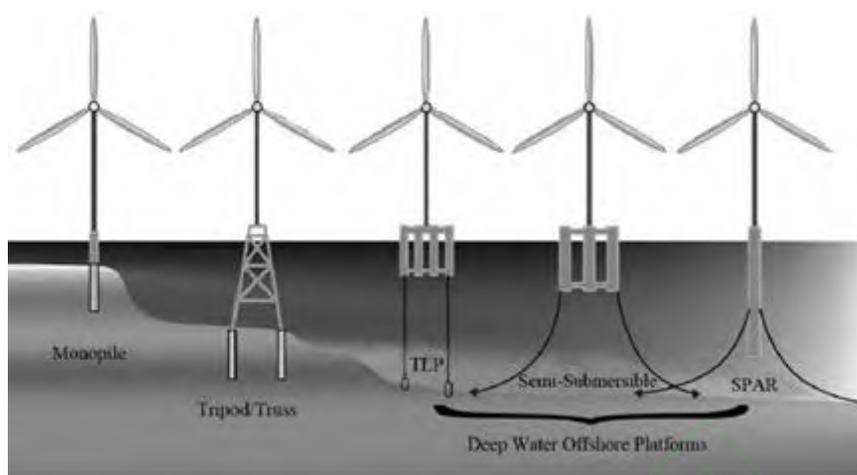


图1 海上风机发展趋势^[1]

Fig.1 Development of floating offshore wind turbines

随着海上风能开发逐渐向深海进发，传统的重力式、桩基式等固定式基座的经济成本显著提高，因此海上漂浮式风电机的概念被提出^[2]，并逐渐成为深海风能开发利用的主力。海上风力发电机系统一般包含风机（包括叶片、桨毂、机舱等结构）、塔架、浮式支撑平台、锚泊系统这四部分，各部分结构之间的运动既相互独立又相互影响。由于浮式风机系统结构以及海上环境的特殊性，海上浮式风机相比陆上风机或浅海固定式风机会承受更加复杂的环境载荷，如图2所示。除了像传统固定式风机一样受到作用在风机叶片上的气动力载荷之外，海上浮式风机还会受到波浪和海流作用在支撑平台上的水动力载荷，以及系泊系统作用在支撑平台上的系泊载荷。此外，对于在特殊环境中工作的海上浮式风机，其承受的环境载荷会更加复杂。例如，在冰区海域中作业的海上浮式风机还要考虑到海冰对平台结构及水动力性能的影响等。值得注意的是，环境载荷并不是相互独立地作用于海上浮式风机系统，各种载荷之间都存在一定的耦合关系。因此，如何在考虑浮式风机系统承受复杂环境载荷的前提下准确地对其进行气动力-水动力耦合分析，一直是浮式风机研究领域的重点和难点。本文将从风机叶片气动力性能分析、支撑平台水动力性能分析、浮式风机系统气动力-水动力耦合分析以及相关实验这几方面对海上浮式风机耦合分析的相关发展情况进行综述性的介绍。

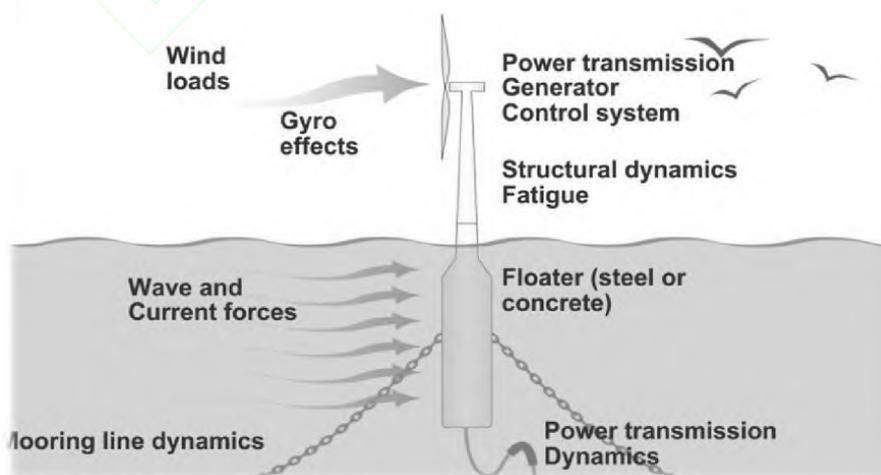


图2 海上浮式风机面临的环境载荷

Fig.2 Environmental loads on floating offshore wind turbines

1 风机气动力性能分析方法

作为整个浮式风机系统最为重要的结构, 风机的空气动力学特性直接关系到风机自身的结构变形和功率输出, 对风机气动力载荷的准确预报无论是对海上浮式风机, 还是对陆上和浅海固定式风机都具有十分重要的意义. 另外, 出于对海上风力发电成本的考虑, 海上浮式风机的单机功率和叶片尺寸越来越大, 这对风机气动力载荷的准确预报和分析提出了更大的挑战. 目前有许多计算风机气动载荷的方法, 其中最经典的方法是叶素-动量理论(BEM, Blade Element Momentum). 此外, 势流分析方法通过将三维势流模型应用到风机的气动力载荷计算中, 比 BEM 更能准确地模拟叶片失速等三维问题. 而在 BEM 的基础上发展出的致动线模型(ALM), 通过引入虚拟体积力来代替风机的真实叶片, 实现了对风机气动力载荷快速求解. 近年来随着计算机性能的提高和数值计算方法的发展, 计算流体力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)方法在风机气动力载荷的计算中得到越来越广泛的应用. 下面就这几种理论和方法进行简单介绍.

1.1 叶素动量理论 (BEM)

叶素动量理论(BEM)是计算风机气动力载荷的提出最早、最经典的方法之一. 该方法具有计算简单、求解快速的特点, 在有准确可靠的翼型数据时, 能够取得令人满意的结果^[3], 因此被广泛应用于工程计算中. 目前大部分计算风机气动力载荷的工程计算软件都是基于叶素动量理论, 如 FAST, Bladed 等.

动量理论于 1865 年由 William Rankine 提出, 该理论忽略了风机叶片上的受力及绕流细节, 通过风机轴向的动量变化来估算风机的功率输出. 在此基础上, 可以得出风能的极限利用率——贝兹极限. Richard Froude 在 1889 年提出叶素理论, 其基本思想是将叶片沿展向分成若干叶素单元, 并假定作用在各叶素上的力互不干扰, 不考虑叶素沿展向的变化, 将叶素视为二元翼型. 通过对作用在各个叶素的气动力沿展向积分, 进而得到作用在整体叶片上的气动力载荷. 叶素动量理论采用将动量理论与叶素理论相结合的方法来求解叶片的局部诱导速度^[4], 如图 3 所示. 该理论将三维叶片的绕流问题简化为绕翼型的二维流动问题, 并假设叶片不同截面各自独立, 基于可靠的翼型升阻力系数资料及叶片不同截面的入射攻角来分析气动力载荷沿叶片的分布情况.

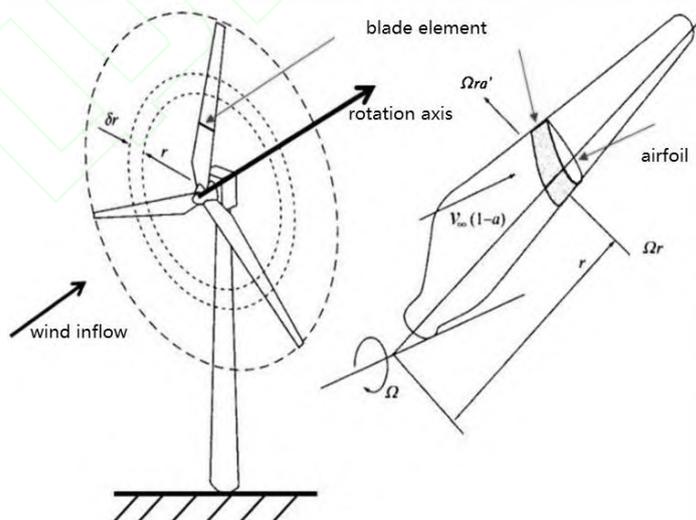


图 3 叶素动量理论示意图

Fig.3 Blade Element Momentum (BEM)

叶素动量理论中通过计算气流在二维翼型剖面处的入流角 φ

$$\varphi = \arctan \left[\frac{v_{\infty}(1-a)}{\Omega r(1+a')} \right] \quad (1)$$

其中, v_∞ 是来流风速, a 是轴向诱导因子, a' 是周向诱导因子, Ω 是风轮转速, r 为叶片半径.

得到二维叶素截面处的攻角: $\alpha = \varphi - \beta$ (β 为桨距角), 并根据攻角 α 插值得到翼型的升力系数 C_l 和阻力系数 C_d , 进而得到作用在叶片沿翼展方向长度为 dr 的叶素的空气升力 dL 和阻力 dD 分别为

$$dL = \frac{1}{2} \rho w^2 c C_l dr, \quad dD = \frac{1}{2} \rho w^2 c C_d dr \quad (2)$$

其中, ρ 为空气密度, c 为叶片弦长, w 为叶片截面处的相对风速.

进一步, 通过对叶素上的受力沿叶片展向进行积分, 可以得到叶片的整体受力情况.

在叶素动量理论中, 为了弥补因简化问题而带来的精度损失, 获得更加准确的叶片气动力性能参数, 需要对结果进行相关修正, 包括考虑叶尖涡三维效应的叶尖损失修正^[5], 考虑叶片攻角随时间急速变化而失速的动态失速修正, 考虑轮毂对风机气动力性能影响的轮毂损失修正以及偏航尾迹修正等.

叶素动量理论由于原理简单, 计算量小等优势一直受到研究者的青睐, 但因为其计算精度严重依赖于已有翼型升阻力系数的实验数据, 限制了新型风机翼型的研发和应用, 同时一些相关的修正模型也很难满足复杂工况下的精度要求, 从而严重制约了叶素动量理论的发展.

1.2 势流方法

为了能够获得更加详细的风机空气动力学性能, 同时保证计算效率, 人们将三维势流理论引入到风机的气动力性能计算中来. 常用的势流模型主要包括升力线理论、升力面理论、格林函数法等. 升力线理论^[6]主要对大展弦比机翼气动力进行分析, 采用 Γ 型涡系列的叠加模型来描述有限翼展机翼的升力模型, 使得附着涡线上的环量能够连续变化, 进而模拟出机翼升力沿展向的变化. 当升力线的环量分布 $\Gamma(y)$ 已知时, dy 宽度上机翼的升力可按二维流计算得到

$$dL = \rho v_\infty \Gamma(y) dy \quad (3)$$

整个机翼的升力 L

$$L = \rho v_\infty \int_{-l/2}^{l/2} \Gamma(y) dy \quad (4)$$

整个涡面在 y 点产生的下洗 ω_i

$$\omega_i = \int_{-l/2}^{l/2} d\omega_i dy_1 = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{d\Gamma/dy_1}{4\pi(y_1 - y)} dy_1 \quad (5)$$

得到整个机翼的诱导阻力 R_i

$$R_i = \int_{-l/2}^{l/2} dR_i dy = -\rho \int_{-l/2}^{l/2} \omega_i \Gamma dy = -\rho \int_{-l/2}^{l/2} \Gamma \int_{-l/2}^{l/2} \frac{d\Gamma/dy_1}{4\pi(y_1 - y)} dy_1 dy \quad (6)$$

相比于升力线理论, 升力面理论^[7]更适合分析中小展弦比机翼的升阻力. 不同于升力线理论使用单根涡线来代替附着在机翼表面的附着涡系, 升力面理论改用附着涡面来描述机翼, 仍可使用 Γ 型涡系列的叠加模型来描述机翼的升力模型. 格林函数法的思路是将边值问题转换为积分方程进行求解, 主要是在机翼表面分布奇点, 利用机翼表面所满足的边界条件, 得到关于奇点的一组方程, 进而求解得到奇点的分布强度. 这些奇点可以是源、汇、偶极子或者涡, 得到奇点的分布强度后即可求得流场的速度势, 计算出速度和压力, 进而得到机翼的升阻力以及相关气动力性能.

上述方法相对于叶素动量理论, 可以更加准确地模拟叶片失速等三维流动问题. Whale 等^[6]基于升力

面理论提出了一种三维入流修正方法, 通过与美国国家可再生能源实验(NREL, National Renewable Energy Laboratory)进行的一系列风洞实验数据相比较, 发现该方法相对于二维入流修正方法具有更高的精度, 尤其对受到失速和叶根影响的叶片内侧攻角的修正能取得很好的效果. Preuss 等^[8]基于升力面理论分别对处于稳定流和非稳定流中的垂直轴风机的表面压力分布和输出功率进行计算, 发现不考虑风机实际厚度的积分计算结果与考虑风机真实厚度的结果十分相近, 并将计算结果与直升机悬停时的实验数据相比较, 发现二者十分吻合.

上述势流模型均基于势流理论发展而来, 没有考虑到叶片周围流场的粘性效应以及流动分离情况. 因此, 为了让势流方法模拟的流场结果更加接近于真实情况, 一些学者对此进行了相关研究. Snel^[9]和 Schepers^[10]等提出一系列工程模型, 用来描述由于变桨运动, 相干阵风以及偏航所导致的尾流不稳定和转子入流不均匀, 并通过实尺度涡轮机进行实际测量, 风洞测量以及高级自由尾流方法对模型进行验证, 结果表明随着涡轮机尺寸和纵摇速度的增大, 动态入流效应变得十分重要, 并且随着负载和叶尖速比的增加, 在偏航条件下的动态入流效应变得十分显著. Suciu 等^[11]针对升力面的尾流翻卷问题, 提出一种用双层势流面来描述尾流的方法, 并利用该方法来估算尾流翻卷对升力面压力分布的影响. Sørensen 等^[12]尝试研究了粘性效应对风机尾流的影响, 值得注意的是, 这一方法目前还不够成熟. 势流方法对风机空气动力学性能进行分析应用还有待进一步发展.

1.3 致动线模型 (ALM)

致动线模型(ALM, Actuator Line Model)发展自致动盘模型(ADM, Actuator Disk Model). 在致动盘模型中, 假定流动是轴对称的, 真实的叶片被具有相同扫掠面积的简单圆盘所代替, 并用求解 Euler 或 Navier-Stokes 方程来替代 BEM 中的动量理论. 由于使用了轴对称假设, 所以致动盘方法是一种二维方法, 存在较大的局限性. 在此基础上, Sørensen 和 Shen^[13]抛弃致动盘方法中的轴对称假定, 于 2002 年提出了全三维的致动线模型(ALM, Actuator Line Model). 致动线模型采用带体积力的虚拟致动线来模拟真实的风机叶片, 将叶片沿径向离散为若干叶素, 利用已知翼型的升阻力系数资料来计算气动力载荷沿叶片径向的分布情况, 然后将叶片对流场的反作用力简化为沿致动线分布的体积力作用于流场.

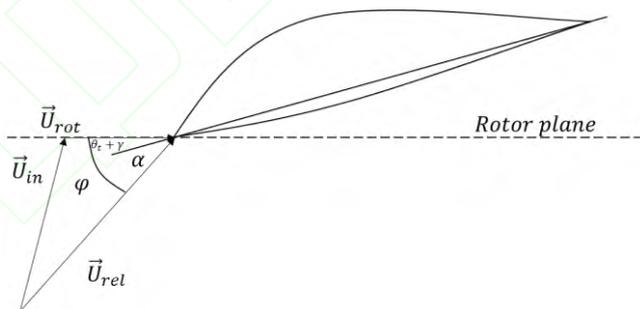


图 4 叶片截面处的速度矢量关系图

Fig.4 Velocity components on a blade element

致动线模型采用与 BEM 相同的方法来计算致动点处的流体力. 图 4 为致动单元处叶片截面的速度矢量关系图, 通过计算可以得到叶片截面处的相对风速 U_{rel}

$$|U_{rel}| = \sqrt{U_{in}^2 + (\Omega r - U_{rot})^2} \quad (7)$$

上式中, U_{in} 为来流风速, Ω 为风轮旋转速度, r 为该叶片截面相对风轮旋转中心的半径, U_{rot} 为周向诱导速度.

入流角 φ

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{|U_{in}|}{|\Omega r| - |U_{rot}|} \right) \quad (8)$$

进而得到叶片攻角: $\alpha = \varphi - \theta_i - \gamma$ (θ_i 和 γ 分别是叶片的局部扭转角和局部桨距角), 再通过插值方法可以求得相应的升力系数和阻力系数, 进而得到每个致动单元处的体积力

$$f = (L, D) = \frac{\rho |U_{rel}|^2 c N_b}{2rd\theta dz} (C_L e_L + C_D e_D) \quad (9)$$

式中, c 是每个致动单元处对应叶片的物理弦长, N_b 是叶片的总数, r 是致动单元处的半径, C_L 和 C_D 分别是通过插值得到的翼型升力系数和阻力系数, e_L 和 e_D 分别为升力和阻力方向单位向量.

值得注意的是, 上述计算得到的体积力在作用于流场之前需要进行光滑, 以避免数值振荡. 高斯光滑函数表达式如下

$$\eta_\varepsilon(d) = \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp \left[- \left(\frac{d}{\varepsilon} \right)^2 \right] \quad (10)$$

光滑后的体积力可以写成如下形式

$$f_\varepsilon = f \otimes \eta_\varepsilon$$

$$f_\varepsilon(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i, z_i, t) \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp \left[- \left(\frac{d_i}{\varepsilon} \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 是第 i 个致动点, d_i 是点 (x, y, z) 到致动点 (x_i, y_i, z_i) 之间的距离, ε 是高斯宽度系数. 高斯宽度系数的取值根据翼型弦长和叶片附近网格尺寸确定, 为了保证数值稳定性^[14], 一般取 $\varepsilon = 2\Delta x$ (Δx 为叶片附近网格单元的长度).

由于致动线模型采用虚拟的致动线来代替风机的叶片结构, 因此不需要求解风机叶片表面的真实边界层, 从而节省了计算时间, 同时还能得到精度较高的气动力载荷, 以及叶根涡和叶尖涡等流场信息, 因此该方法常用于一台或多台风机的尾流场模拟.

国内外学者结合致动线模型和三维 N-S 方程对风机进行了大量的数值模拟. Troldborg 和 Sørensen^[14] 利用致动线模型对一台三叶片 500kW 的风力机进行数值模拟, 得到了风机尾流场的详细特征以及风机的功率输出曲线, 结果与实际测量得到的功率特性曲线吻合良好. Lu 等^[15] 结合 ALM 和三维大涡模拟 (LES, Large Eddy Simulation) 对具有稳定边界层的理想风场内部的风机尾流进行分析, 观察到由于叶片的旋转效应和科里奥利效应而导致的风机尾流不对称现象, 发现科氏力会引起尾流的变形从而使得一部分湍动能远离尾流中心, 同时观察到风电场对垂直湍流的动量和热量有着强烈的影响. NREL 的研究人员基于开源程序包 OpenFOAM 开发了一个 ALM 的 C++ 类, 使得 OpenFOAM 中的任意求解器都能通过简单的修改而包含该类对象, 它能与 RANS/LES 相结合, 用于整个风电场的模拟^[16-17]. 李鹏飞等^[18-19] 考虑到海上浮式风机的气动力性能会受到支座平台六自由度运动的影响, 在 ALM 的基础上, 引入由于平台运动而诱导出的风机运动速度, 从而提出一种非稳态致动线模型 (UALM, Unsteady Actuator Line Model), 并利用 NREL 提出的 5MW 浮式风机对该模型进行验证. 进一步地, 结合 UALM 和基于 OpenFOAM 开发的两相流求解器 naoe-FOAM-SJTU 对处于周期性纵荡和纵摇运动下的浮式风机系统进行数值模拟, 发现风机的气动推力和输出功率均呈现周期性的变化趋势, 且风机的尾涡结构呈现出高度的不稳定性.

致动线模型, 相对于普通全模型的 CFD 方法对网格要求较低, 求解效率更高; 而与 BEM 或势流方法相比计算精度更高, 既能得到风机尾流场, 又能计算风机整体气动载荷, 因此近年来在风机气动性能数值模拟中得到了迅速发展.

1.4 计算流体力学(CFD)方法

计算流体力学(CFD)是随着计算机的发展而产生的一个介于数学、流体力学和计算机之间的交叉学科, 主要研究内容是通过计算机和数值方法来求解流体力学的控制方程, 对流体力学问题进行模拟和分析. 近年来, 随着计算机性能的提高和数值计算方法的发展, CFD 方法在风机叶片的气动力性能分析中得到了越来越广泛的应用. CFD 方法直接对描述粘性不可压缩流体动量守恒的 N-S 方程(Navier-Stokes equations)进行数值求解, 流场的控制方程为

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (12)$$

$$f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v = \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \quad (13)$$

相比于传统的势流理论, CFD 方法能够更加准确地模拟流场中流体的实际运动情况, 得到更加精细的流场信息, 尤其当粘性效应较大时, CFD 具有十分明显的优势. 但需要注意的是, CFD 相较于前面提到的这些方法, 往往需要付出更大的计算代价.

19 世纪 70~80 年代, 基于势流理论的 CFD 技术首先被应用于飞机翼型及直升机螺旋桨的研究中. 但势流理论无法对风机产生的尾涡及详细流场等情况进行系统研究, 这限制了其进一步的发展. 为了突破势流求解的限制, 欧洲的一些学者首先开始利用 Navier-Stokes 方程来计算分析风力机翼型的空气动力性能. 考虑到 Navier-Stokes 方程本身是不闭合的, 因此其需要配合适当的湍流模型进行求解. 于是, 基于雷诺平均的 Navier-Stokes 方程求解方法在 19 世纪 90 年代开始被广泛应用. 目前应用于风力机翼型气动性能模拟的湍流模型主要是 Menter 提出的 $k-\omega$ SST 二方程湍流模型, 它综合了 $k-\varepsilon$ 湍流模型在近壁区的计算优点和 $k-\omega$ 湍流模型在远场的计算优点, 十分适合二维翼型尾迹流动的数值模拟. Travin、Strelets、Johansen 等学者尝试采用分离涡模拟方法(DES, Detached Eddy Simulation)对风力机二维气动性能进行研究. 但 DES 方法需要更为细致的网格划分, 因此其计算代价也是惊人的, 这从某种意义上限制了其进一步地应用. 随着计算机技术的飞速发展, 其可处理的数值模型的网格规模也不断攀升, Fleig 等人利用大涡模型对 3 亿网格的风机三维模型进行了叶尖旋涡结构的模拟. 国内, 任年鑫^[20]基于二维 Navier-Stokes 方程及 $k-\omega$ SST 湍流模型对大型海上风力机主流二维翼型的气动性能进行了数值模拟. 周胡等^[21-23]基于 OpenFOAM 自带的瞬态求解器 pimpleDyMFoam 和 MRFSimpleFoam 分别对均匀和非均匀风场中风机叶片的三维粘性扰流场进行非定常数值模拟^[84], 将计算结果与实验数据相比较, 验证了该求解器求解三维风机叶片复杂粘性流场的可靠性; 其采用非结构化网格和 $k-\omega$ SST 湍流模型, 对两叶片和三叶片风机周围的非定常流场进行数值模拟, 比较分析了不同工况下不同叶片数的风力机气动性能的特点和差异; 还对四种典型工况下的上风向风机和下风向风机的非稳态特征进行对比, 发现下风向风机的推力减少受到风机塔架的影响较大. 赵文超^[24-25]等基于 OpenFOAM 提供的求解器 pimpleDyMFoam 对不同工况下的风机叶片进行数值模拟, 研究不同的湍流模型对数值模拟精度的影响, 通过与实验结果进行对比, 为选择合适的湍流模型提供参考; 采用滑移网格对 NREL 5 MW 海上浮式风力机在不同来流风速下的风力机性能和尾迹区风场特征进行了系统模拟. 相比与滑移网格技术, 重叠网格方法在保证模拟精度的前提下能够很好地处理大变形问题, 程萍等^[26-27]采用重叠网格方法分析了塔架对风机气动性能的影响, 同时还将重叠网格技术应用到非稳态浮式风机气动性能的数值模拟中, 验证了该方法的可靠性.

可以看出, 随着计算机以及计算方法的不断发展, CFD 将在风机气动力性能分析方面起到越来越重要的作用.

1.5 多风机相互干扰问题

出于经济性等问题的考虑, 风机从来都不是单个出现的, 而是以风电场的形式存在. 风电场的风机集

群化并网发电方法,可以进行大规模风力发电布置,然而,研究发现:风力机的数目与发电量增加并不成正比,当风力机达到一定数量后,风力机的增加反而会导致风电场发电量减少,原因在于风电场中的风力机之间存在十分明显的尾流相互干扰效应.由于风力机提取风的动能转化为机械能,因而空气通过旋转的风力机转子时产生动能损失,会在下游形成风速下降、湍流强度增大的区域,该区域被称为尾流区^[28].风力机之间的距离越近,尾流相互干扰效应越明显,上游风机对下游风机影响越显著.考虑到风力机的空气动力特性不仅影响风力机本身的功率输出和结构变形,而且关系到风电场中不同风力机之间的相互作用,影响整个风电场的发电量.风电场中的尾流损失可能导致相当大的能量损失,尤其是在低于风机作业的额定风速时.某些工程中,风电机组的小间距排列会加剧阵列尾流损失,同时阵列尾流损失也和低水平的海上风况的大气湍流有关^[29].例如,Lillgrund海上风电场中采用的是48台,功率为2.3MW,叶轮直径为93.5m的风电机组.这个风电场的风电机组是在相当小的间距下建造的(每一排3.3D,行间距4.4D).图5显示的是在非常湿润的天气条件下,尾流被水蒸气“可视化”的图景,可以明显的看到后排的风机受到前排风机尾流的影响.后期的测量表明,其每台风力机的平均发电量由于尾流损失减少了约23%.由于前排风机的影响,风电场中单个风力机的尾流损失可能高达45%.



图5 Lillgrund海上风电场^[30]

Fig.5 Visualization of wake flow in Lillgrund floating wind farm

考虑到在风电场有限面积获得最大经济效益这一问题,需要在风电场内需要布置尽可能多的风力机,一些风力机无可避免将处于其它风力机的尾流区中,导致风力机疲劳载荷增大、输出功率减小,影响整个风电场的经济效益和安全运行^[31].美国加州风电场的运行经验表明,尾流效应造成能量损失的典型值是10%;根据地形地貌、风力机的间距和风的湍流强度不同,尾流损失最小是2%,最大可达30%^[33].除降低风速,减少发电量外,风力机尾流效应同时增大了下游风力机疲劳载荷、失效概率,因而增加了风电场运行和维护成本.研究表明,处于尾流区内风力机疲劳载荷增大了5%-15%^[34].2010年,贺德馨^[32]指出目前风电场年平均等效满负荷小时数低于1800,低于国际上一般风电场指标的一个重要原因在于“风电场布置,尤其是复杂地形下的合理布置”.

针对于风电场的尾流干扰效应,此前已有许多的研究学者使用不同的研究手段进行了大量的研究分析.主要有尾流模型方法,实验方法,包括模型实验以及实尺度实验方法,以及CFD等研究方法.

Katic^[35]提出一种一维的线性尾流模型——Park尾流模型来分析风电场中的尾流干扰,并且这一理论

被应用于风能资源评估软件 WAsP 中,拥有可靠的精度.受到一维尾流模型的启发,不同类型尾流模型随之被研究出来,而且其维度也从一维拓展到了二维和三维.例如,二维尾流模型有 Ainslie^[36]尾流模型, Larsen^[37]尾流模型.基于 CFD 理论的三维尾流模型如 RGU^[38]模型也被一些学者提出并用于风电场的模拟.

尾流模型没有能真实地捕捉到风电场尾流的湍流特性,而湍流特性对于风机尾流特性特别是尾流相互干扰来说是十分重要的一个因素,其对于风机气动性能的影响是十分显著的.考虑到这个问题,一些学者尝试利用实验手段来进行风电场的尾流特性研究分析.其中,Whale, Andrsen 等^[39]利用 PIV(Particle Image Velocimetry)技术来捕捉分析风机风轮旋转产生的尾涡结构,进而研究风机的尾流特性.而 Vermeer^[40]利用风洞实验研究了单风机和风场的风机在近尾流区以及远尾流区的尾流特性和尾流相互干扰效应.

实验研究手段带来的一个明显的问题就是其存在显著的尺度效应,这对于尾流干扰效应的研究产生了显著的影响. Frandsen 等^[41]研究表明,利用 CFD 技术可以很好地模拟风电场,并且能考虑到湍流影响,不存在尺度效应问题.很多学者利用 CFD 方法进行风机尾流相互干扰问题的研究. Choi 等^[42-43]使用了 CFD 求解器 ANSYS-CFX 对 2 台风机和 3 台风机的气动性能以及尾流干扰效应进行全三维的数值模拟,具体研究了风机间距对于风电场功率输出的影响,计算结果表明,随着间距增大,其总体输出功率也会随之增大,而且上游风机的尾流区被划分为强尾流影响区和弱尾流影响区.在强尾流影响区里,风机受到尾流的干扰影响大,其功率损失比较严重,当下游风机脱离了强尾流影响区时,风机输出功率会明显增大.田琳琳等^[44]结合致动盘理论和 CFD 方法,采用 Fluent 软件对风电场内 9 台风机尾流干扰情况进行了数值模拟,并研究了不同偏航角对尾流干扰现象的影响.李少华等^[45]采用 Fluent 对不同排列情况下固定间距的 2 台风机进行了数值模拟,对比分析了单风机和不同角度布置的两风机的输出功率以及流场分布情况,结果表明,尾流干扰会对风电场的功率输出产生十分大的影响.张玲等^[46]利用 Fluent 对 4 台风机分别在串列式和错列式布置方式下以及不同入流角的情况下进行了数值模拟,研究了叶片与塔架以及风机之间尾流相互干扰对下游风机功率输出的影响.

Churchfield 等^[47-48]采用 SOWFA^[49]软件使用大涡模拟方法分析了风机的尾流干扰效应. Fletcher 和 Brown^[50]采用基于 CFD 方法的涡传递模型研究了两风机风电场中的尾流相互干扰现象.其考虑了下游风机位于上游风机全尾流区域情况和部分尾流情况下,研究了不同纵向间距和横向间距对于两风机尾流干扰效应. Mikkelsen 等^[51]采用致动线和 CFD 相结合的方法,同样考虑下游风机位于上游风机全尾流区域情况和部分尾流情况下,研究三个风机的功率输出情况以及尾流相互干扰效应.其研究表明,风机间距为 5 个风机直径时,风轮相互干扰影响较小,总功率提高比较明显. Troldborg 等^[52]使用致动线模型以及大涡模拟方法,考虑了不同湍流强度的入流,大气边界等因素,研究了不同风机间距下,两风机之间的尾流相互干扰效应.

虽然目前仅仅针对固定式多风机相互干扰问题进行了研究,但是随着浮式风机耦合问题研究手段的进步与海上风电场数值模拟的需求,对多个浮式风机的相互干扰问题也将逐渐得到发展.

2 浮式支撑平台的水动力性能分析

随着风能开发技术地不断成熟,风力发电逐渐从陆上走向海洋,海上浮式风机成为未来海上风机的发展趋势.浮式支撑平台作为浮式风机系统的重要组成部分,会受到来自风浪流联合作用的动力载荷以及系泊系统的约束力,并在上述复杂载荷的作用下产生运动,而支撑平台的运动又会影响到上部风机的气动力性能.因此,对于海上浮式风机系统,对浮式支撑平台的水动力载荷及响应进行准确预报有非常重要的意义.在作为 IEC 61400-1^[53]陆上风机设计规范的有效补充并特别针对海上风力机设计要求的 IEC

61400-3 规范^[54]中, 明确规定了有关海上风机水动力载荷分析的内容. 相比于陆上风机, 海上风机还需要额外考虑波浪、海流等水动力荷载. 而相比于近海固定式风力机, 海上浮式风机还需考虑其支撑平台运动所引起的辐射水动力荷载、附加水动力阻尼等影响因素.

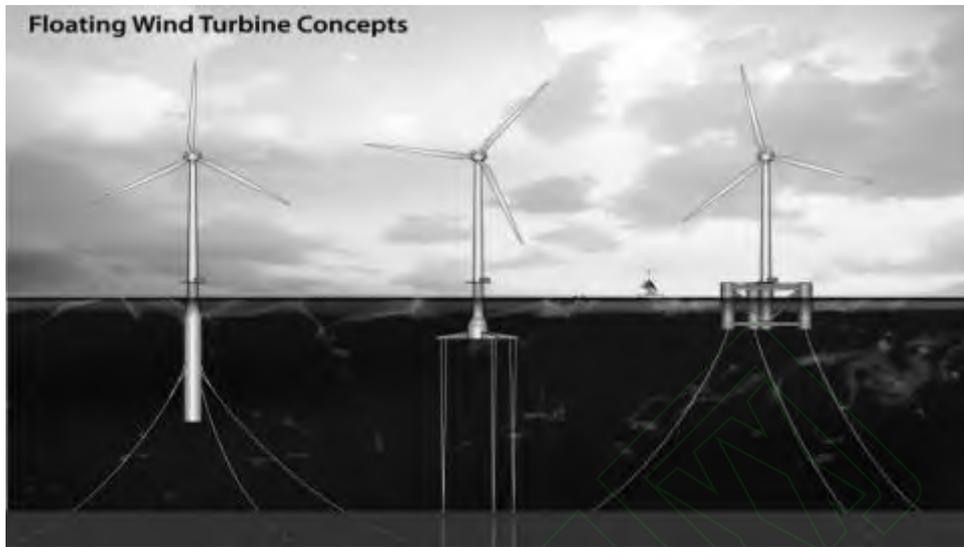


图6 海上风机支撑平台类型

Fig.6 Platform concepts for floating offshore wind turbines

受海洋石油领域浮式平台的启发, 目前海上浮式风机支撑平台主要有 Spar 型浮式平台、半潜式浮式平台和张力腿式(TLP)浮式平台以及在这三种基础形式上进行改进得到的一些新型结构. 虽然海上浮式风机的概念提出不久, 但是人们在对海上石油平台的研究过程中已积累了较为丰富的经验. 因此, 对海上浮式风机支撑平台的水动力学研究大都借鉴于传统海洋工程中浮式平台的研究方法. 对浮式风机支撑平台水动力性能的研究方法主要包括: Morison 公式方法、势流理论方法、计算流体力学(CFD)方法.

2.1 Morison 公式法

Morison 公式是在海洋工程领域有着广泛应用的经验公式, 由 Morison^[55]于 1950 年提出. Morison 公式主要用于计算小尺度结构物上的波浪载荷, 重点考虑附加质量效应和粘性阻力效应.

$$F(t) = \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \dot{u}(t) + \frac{1}{2} \rho C_D D u(t) |u(t)| \quad (14)$$

在对近海固定式风力机的水动力载荷分析中, 国内外很多学者借鉴较为成熟的近海采油平台的分析方法, 利用简化的 Morison 方法来求解波浪载荷, 对不同基础形式的固定式海上风力机结构进行了大量的水动力分析研究, 并取得了一系列有实际指导意义的研究成果. CHENG^[56]利用 Morison 公式对浮式风机基础平台极限响应下水动力载荷进行计算, 在不考虑海流作用的前提下, Morison 公式计算的精度能够满足要求. Zaaiker^[57]基于 Morison 公式对桩柱动力学模型进行简化, 在保证计算精度的前提下减少了计算量, 通过对不同形式的桩柱、不同种类的风机以及不同的泥沙条件等情况进行计算, 并进行相关参数的敏感度分析, 最后与实验结果进行对比, 在一定程度上验证了该模型的有效性. 但是由于传统 Morison 公式方法本身无法很好地考虑自由势表面的记忆效应及多模态运动耦合的辐射问题, 所以限制了其在海上浮式风力机分析中的应用. RAINEY^[58]对 Morison 公式进行修正, 主要包括替换公式中的惯性项以及用阻力项仅描述涡度的影响, 使得修正后的 Morison 公式在满足构件直径大于其长度的 1/10, 或相对流速的 1/5, 或结构运动半径的 1/20, 或波长的 1/30 时具有较高的计算精度. 这说明, 在细长结构物的特征尺度与波长的比值足够小的情况下, 修正的 Morison 公式依然是一个不错的选择.

2.2 势流理论

相比于小尺度结构物,大尺度结构物的存在及其运动对流场的干扰是不能忽视的,此时附加质量效应和绕射效应要大于粘性效应的影响.因此,在保证计算精度的前提下能够利用三维势流理论来进行浮式风机支撑平台的水动力性能分析.由于势流理论计算简便,效率高,目前被广泛应用来计算浮式平台的水动力载荷,一些应用较为广泛的商用软件也都是基于三维势流理论,如 SASAM, HYDROSTAR, AQWA 等.阮胜福^[59]通过建立浮式风机系统的有限元模型,利用 SASAM 软件计算浮式风机系统在紊动风,定常流以及不规则波联合作用下的水动力载荷,何江贤^[60]基于三维势流理论和 Morison 公式相结合的方法建立平台的水动力计算模型,通过 AQWA 来计算平台受到的水动力载荷并,通过和模型实验数据相比较,验证了该模型的准确性.

Wayman^[61-62]通过开发一套可以用来在频域内计算浮式风机系统结构、水动力和空气动力耦合响应的程序,对用来支持 5MW 风机、适用于 30~300m 水深的风机平台进行了预研. Brommundt 等^[63]在频域范围内对半潜式浮式风机(Tri-floater)悬链式锚链系统进行优化研究,在不考虑二阶波浪漂移力情况下,使用 Matlab 编程获得该浮式风机锚链最佳长度、角度以及布置方向等优化参数. Karimirad 和 Moan^[64]使用 Simo-Riflex-TDHMILL 程序包,对两种不同尺度的 OC3-Hywind Spar 浮式风机支撑平台在风浪作用下的总体运动响应进行了快速、高效的简化分析.他们将气动力简化为随相对风速变化的函数,水动力则采用 Panel 方法和 Morison 公式计算. Zhang 等^[65]对 60m 水深环境下,充分考虑风、浪、流以及锚泊的耦合效应,对承载 600KW 水平轴风机的 WindFloat 型半潜式浮体进行研究.

由于浮式平台的结构尺寸较大,基于势流理论的分析方法在较大程度上能够满足工程应用的精度要求,并且已有一些应用比较广泛的商业软件,因此在浮式风机支撑平台的水动力研究中,势流理论的分析方法受到了很多学者的青睐.

2.3 计算流体力学(CFD)方法

近年来随着计算速度的提高以及计算方法的发展,CFD 方法被用来对 N-S 方程进行求解.相较于势流理论,CFD 方法能够考虑真实流体粘性的影响,捕捉到更为详细的流场细节,具有更高的计算精度.因此,CFD 方法在浮式平台水动力学的计算中得到广泛应用,越来越多的学者选择用 CFD 方法来进行研究. Bredmose^[66-67]利用开源 CFD 软件包 OpenFOAM 结合自由面处理技术 VOF 研究了破碎波对海上风力机基座和风力机观测平台的影响. Wu 等^[68]为模拟风机转子受到浮式风机支撑平台六自由度的影响而提出一种 CFD 模型,通过与已有文献中的计算数据对比来对该模型进行验证,并利用该模型对 5MW 浮式风机在典型海况不同风速下受到平台运动影响的气动力特性进行数值模拟,结果与 FAST 计算得到的数据具有良好的一致性. Tran 等^[72]分别用势流方法和 CFD 方法对 DeepCWind 半潜式风机平台的水动力性能进行了研究.分析了不同湍流模型对于计算结果的影响,同时进行了网格收敛性验证以及时间步收敛性验证,并与现有的标准数据进行对比从而对计算结果的可靠性进行验证.周胡^[69]采用基于 OpenFOAM 开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器模拟风电场基座与波浪的相互作用,Zhao^[70]和 Cheng^[71]同样基于 OpenFOAM 比较分析了在风机停转和正常工作情况下平台运动的水动力学特性,结果表明浮式风机平台的纵摇和纵荡运动明显受到风机气动载荷的影响. Dunbar 等^[73]则基于 CFD 开源代码平台 OpenFOAM 进行了带自由面物体六自由度强耦合模块的开发,并对 DeepCWind 的半潜式平台水动力性能进行了计算,通过与 FAST 软件计算的结果进行对比,验证了该模块的可靠性.

由于上述 Morison 公式法和势流理论方法计算效率高,且能满足一些基本的工程要求,而计算流体力学方法对网格精度以及计算资源有较高的要求,因此很长一段时间 CFD 方法都限制在理论研究领域.然而随着计算机技术的发展,计算资源的限制不再显著,因此在浮式支撑平台的水动力研究领域,CFD 方

法也受到越来越多学者的青睐。

2.4 浮式支撑平台新概念的提出

浮式风机的支撑平台大多借鉴于传统海上油气开发应用的平台类型，同时要考虑浮式风机作业环境和作业要求的特殊性。区别于海上石油开发平台，深海浮式风机支撑平台出于经济性考虑，其尺寸相对较小，但仍旧需要支撑风机在复杂恶劣的海况下进行正常作业，保障浮式风机系统整体的稳定性，同时为浮式风机提供良好的作业条件，这就对浮式支撑平台的水动力性能提出了更高的要求。为了更好地满足浮式风机地作业要求，大量学者基于传统海洋平台的基本形式进行改良提出了一些新型浮式风机支撑平台形式。

Cermelli 等^[74]提出了一种适合于深水边际油气田开发的 Mini-Float 平台概念，这是一种多立柱式半潜平台，可以有效避免涡激振动，并且垂荡板的存在增加了 Mini-Float 的附加质量和阻尼，在不增加附体总排水量以及减小附体尺寸的前提下，有效改善了浮式平台的运动性能。Zambrano 等^[75]基于 Mini-Float 平台概念，研究了一种三风机半潜式浮式平台，浮体由三个方形立柱组成，浮式风机分别安装在每根立柱之上。同时还模拟了平台在墨西哥湾极端风暴海况下的六自由度运动特征。Withee 等^[76]提出了一种 TLP 和 Spar 相结合的浮式风机支撑平台，并开发了全耦合动力响应程序来预测风机系统在随机风和波浪作用下的运动响应，通过数值模拟发现其具有良好的水动力学性能。Lee^[77]提出了两种浮式风机系统的概念设计，并对它们在风浪中的运动响应进行了评估。除了提出新型平台形式外，Rommundt 等^[63]还对半潜式浮式风机 (Tri-floater) 的悬链式锚链系统进行优化研究，得到浮式风机锚链最佳长度、角度以及布置方向等参数。

3 浮式风机系统气动力-水动力耦合分析

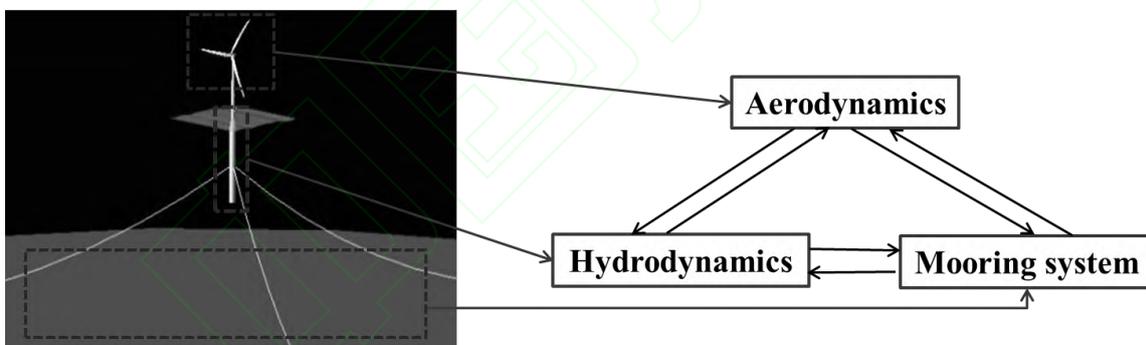


图7 浮式风机系统气动-水动-锚泊耦合示意图

Fig.7 Structure of a floating offshore wind turbine system and its Coupled aero-hydrodynamic mechanism

相比于陆上风力机和近岸浅海固定式风力机，深海漂浮式风力机工作在更加复杂的海洋环境下：上部风力机要承受风载荷，浮式支撑平台和系泊系统要受到波浪和海流的共同作用，而且各部分结构之间会产生相互耦合作用。尽管在固定式风力机的气动载荷分析方面已经有比较成熟的分析，同时平台在波浪下的受力及响应问题也可以参考传统海洋平台的研究方法。然而浮式风机系统的气动-水动耦合问题还要复杂得多：首先，由于上部风力机受到的气动载荷会通过连接浮式平台和上部风力机的塔架传递给平台，尤其随着风力机叶片尺度的不断增加，塔架的高度也已达到了百米量级，在此作用下平台的运动便不再是简单的波浪下的响应；而平台在该载荷与波浪载荷以及锚泊系统的联合作用下产生的运动响应又会通过塔架的连接作用传递给上部的风力机，使得风机叶片的气动载荷以及输出功率发生变化。如此相互耦合作用，也使得气动力-水动力耦合问题的分析成为浮式风力机系统研究中的一大难题。

目前国内外学者对于浮式风机的耦合问题的研究可以分为下面几种情况：(1) 考虑浮式风机支撑平台运动对风机叶片气动性能影响的分析；(2) 气动力-水动力全耦合分析。

3.1 浮式风机支撑平台的运动对风机叶片气动性能的影响

由于浮式支撑平台在环境载荷以及系泊力的作用下会产生一定的运动响应, 同时会带着上部风力机产生相同的额外运动, 从而给风机的气动性能带来一定影响. Jonkman, Matha 和 Robertson 等^[78-80]进行了大量的算例分析, 指出对于悬链线式系泊的风机平台在一般入射波频率下将产生显著的纵摇运动. 对于 OC3-Hywind Spar 型浮子搭载 NREL 5MW 大型风机的浮式风机系统, 在设计载荷工况下, 纵摇运动幅值达到了 8° , 在极端载荷工况下, 纵摇运动的幅值更是达到了 14° , 同时也预测到了显著的低频纵荡运动. 因此有必要研究平台运动对风机非稳态气动性能的影响.

由平台运动引起的额外风速分量将破坏 BEM 理论中基本的动量平衡假定, 因此传统的使用叶素动量理论加上一些半经验修正公式来计算浮式风机的气动载荷的代码 (如 FAST 和 HAWC2) 无法实现这种非定常气动性能的数值模拟.

Tran^[82]使用 star-CCM+ 中结合重叠网格技术对 NREL-5MW 海上风机进行了数值模拟, 模拟中给定风机随平台的周期性运动, 他假定风机绕塔架下端中心 (浮式风机整体系统的纵摇中心) 有一个正弦形式的强迫纵摇运动, 并使用 FAST 进行了非定常叶素动量理论 (Unsteady Blade-Element Momentum, UBEM) 计算. 他对比了两种方法的计算结果, 表明 UBEM 计算的瞬时气动载荷相对于 CFD 方法有所偏高. 并且在纵摇运动幅值为 1° 时, 瞬时气动功率的振荡幅值为 30%, 而在纵摇运动幅值为 4° 时, 瞬时气动功率的振荡幅值几乎达到了 100%. Vaal 等^[83]采用致动盘模型研究了纵荡运动对风机气动载荷及诱导因子的影响, 同时他们也使用叶素动量理论加上两个广泛使用的动态入流模型对相同算例进行了计算验证, 他们的研究表明典型的纵荡运动比较慢, 并不能对动态尾流造成太大影响, 工程上使用的 UBEM 对于纵荡运动下风力机的气动性能的预测有可以接受的精度. 李鹏飞等^[85,95-96]同样考虑平台周期性运动, 将非定常致动线模型 (Unsteady Actuator Line Model) 与 OpenFOAM 相结合, 对给定平台运动下的风机非稳态气动载荷进行了数值模拟, 得出了类似的结论. Cheng 等^[86]运用基于 OpenFOAM 结合重叠网格技术开发的 naoe-FOAM-os-SJTU 求解器分别对考虑平台纵荡与纵摇运动情况下的风机进行了气动力分析, 数值模拟中计入了塔架对风机气动性能的影响.

3.2 气动力-水动力全耦合分析

对风力机气动性能和浮式平台水动力性能的数值模拟, 为浮式风机系统的设计研究提供了一定的参考. 但是要想更加精确地模拟正常作业条件下的浮式风机系统的性能, 对浮式风机的气动力-水动力全耦合数值模拟是必要的. 随着对风机气动性能和对平台水动力性能研究的进一步发展, 以及计算技术的进步, 如今浮式风机气动力-水动力全耦合分析也成为可能, 越来越多的学者聚焦在浮式风机系统的全耦合分析上.

目前对浮式风机系统全耦合分析的软件多数是基于已有的陆上风机模拟程序, 添加浮式平台和锚泊系统的模拟, 另外还有一部分是在原有浮式平台水动力模拟代码的基础上增加风力机气动模拟模块. Robertson 等^[97]详细总结了可用于浮式风机系统全耦合数值模拟的一些软件, 如表 1 所示, 目前主要研究方法是叶素动量理论和势流理论相结合的方法.

Jonkman 等^[81]开发了一种水动力-气动力-控制-结构响应的全耦合模拟工具, 这种模拟工具主要集成了 FAST、AeroDyn、HydroDyn 等软件的主要功能. Jonkman 应用这种模拟工具对 ITI 的驳船式浮式风力机系统进行了整体受力分析, 并且通过风力机和浮式基础的相互耦合分析描述了系统的动态响应以及确定的极限载荷和不稳定性分析. Nielsen 等^[87]对 hywind 浮式系统进行了模型尺度的耦合动力分析, 并与尺度模型实验的结果进行了比较. MIT 的 Kim 等^[88-91]开发了 SWIM-MOTION-LINES (SML) 系列软件, 其中 SWIM 模块采用分析方法计算线性的或二阶频域波浪问题, 对于由一些简单几何构成的平台; MOTION

模块用于求解大幅度的低频慢漂运动；LINES 模块则用于决定非线性的系泊系统对平台运动的影响。浮式风机的全耦合数值模拟尚处于起步阶段，大多数研究都基于上述对风动力和平台水动力模拟的方法上开展的，然而研究者们发现有些传统的气动力或者水动力分析方法并不能直接用在耦合分析中。Roddier 等^[93]指出，Morison 公式和势流理论的经验特性无助于浮式风机系统中新的支撑平台的设计。Sebastian 和 Lackner^[92]指出传统的 BEM 加上一些修正（如动态入流、偏航/倾斜模型等）并不能准确描述叶片和尾流之间的相互作用。而且普遍使用的失速模型如半经验的 B-L 模型以及他们对浮式风机动态失速效应的适用性还未被充分研究，因此开发更先进的浮式风机建模方法及耦合分析模型成为必要。

表 1 浮式风机系统全耦合分析软件列表^[97,99]

Tab.1 List of codes for fully coupled aero-hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbines

Code	Code Developer	Aerodynamics	Hydrodynamics	Mooring Model
FAST v8	NREL	(BEM or GDW) + DS	PF + ME	QS
SIMPACK + HydroDyn	SIMPACK	BEM or GDW	PF + QD	QS
Bladed (Advanced Hydro beta)	DNV GL	(BEM or GDW) + DS	PF + ME+ (IWL)	QS
Sino, Riflex + Aerodyn	MARINTEK, NREL	(BEM or GDW) + DS	PF + ME	FE/Dyn
HAWC2	DTU Wind	(BEM or GDW) + DS	ME	FE/Dyn
FOWT-UALM-SJTU	SJTU	ALM+CFD	CFD	QS

注：(BEM: blade element momentum 叶素动量理论；GDW: generalized dynamic wake 通用动态尾流；DS: dynamic stall 动态失速；ALM: actuator line model 致动线模型；CFD: computational fluid dynamics 计算流体力学；PF: potential flow 势流理论；ME: Morison's equation 莫里森公式；QD: quadratic drag 二阶阻力；IWL: instantaneous water level 动态水位；QS: quasi-static 准静态法；Dyn: dynamic 动态法；FE: finite element 有限元)

由于浮式风机系统气动力-水动力耦合问题的复杂性，全模型、实尺度的 CFD 数值模拟将成最理想的工具。目前浮式风机趋于大型化，而对于大型化浮式风机，不仅结构复杂，且存在多尺度效应，这给利用 CFD 方法研究浮式风机的全耦合问题带来了巨大的挑战。Nematbakhsh 等^[94]用 CFD 方法对浮式风机耦合效应进行了初步研究，将风机简化为恒定的推力，使用单相流 Navier-Stokes 方程研究了一种 TLP 浮式风机系统的动态响应。Idaho 大学的 Quallen 等^[98]进行了浮式风机系统的两相流全 CFD 模拟，他们采用重叠网格(Overset)技术来处理平台和风机叶片周围的网格运动。在这些研究中，自由面是完全非线性的，并且没有使用任何经验修正。

上海交通大学万德成团队基于开源软件包 OpenFOAM 分别开发了用于风机气动模拟的非稳态致动线模块、可求解平台在波浪中六自由度响应的 nao-FOAM-SJTU 求解器和锚链系统数值模拟模块，并将这三个模块结合开发了浮式风机水动-气动-锚链系统全耦合计算分析求解器 FOWT-UALM-SJTU，对浮式风机系统的气动-水动全耦合模型进行了数值分析^[95-96]。该求解器结构如图 8 所示。

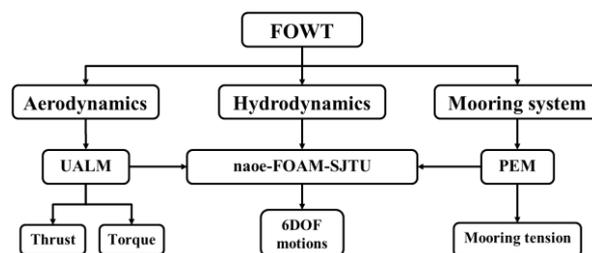


图 8 FOWT-UALM-SJTU 求解器模块

Fig.8 Module of FOWT-UALM-SJTU solver

总的来讲,在对浮式风机的气动力-水动力耦合分析方面,目前基于 CFD 方法的研究还处于起步阶段,并且 CFD 方法还存在诸多未解决的困难,诸如:水气两相流场的计算域的划分、时间步长的选取、随机波浪作用计算的时间问题等。

4 模型实验研究

模型实验在船舶与海洋工程领域是一种非常重要的研究手段。由于各种计算理论和方法的限制,即便在海洋油气行业的浮式结构物的开发过程中也广泛采用模型实验的方法,以预报和验证其运动性能。除了数值方法以外,模型实验也是对浮式风机整体性能进行研究的重要手段。模型实验法比数值模拟要更加直观,同时可以为数值分析提供参考。比较有代表性的浮式风力机形式的水池模型实验包括 Hywind 实验、WindFloat 实验和 DeepCwind 实验。

4.1 关键技术问题

水池模型实验是研究浮式风力机的重要手段,然而实验设计中也存在一定的难点,如相似准则的选取。一般海洋工程领域进行的水池模型实验,需要重点模拟重力和惯性力,所以需要优先考虑弗汝德数相似条件;但是叶片受到空气动力的作用,与粘性密切相关,应该满足雷诺数相似。实践证明,二者很难统一,在模型实验中,由于模型和原型雷诺数不同而造成二者力学性能的差异,称为“尺度效应”(Scale Effect)。当原型叶片和模型叶片局部雷诺数均大于临界雷诺数(Critical Reynolds Number)时,可以不考虑尺度效应的影响。但是,对于风力发电机来说,一般模型叶片的雷诺数远小于临界雷诺数。

针对这一问题,不同学者提出了不同的解决方案。Martin^[105]在 DeepCwind 实验项目中,将实验风速提高了 80%,同时增大了实验叶片的导边粗糙度。这种方案在海洋工程领域模型实验中,常常用来处理粘性相似问题^[101]。除了提高实验风速和增大导边粗糙度,DeepCwind 实验课题组在其实验报告中,还提出了在低雷诺数实验环境下设计实验叶片的方案^[102]。部分学者已经在这方面做了一部分的工作^[103],但目前还没有人提出一套完整详细的实验叶片模型设计方法。

事实上,对于模型实验,傅汝德数相似和雷诺数相似是不可能同时满足的。一般情况下,需要满足傅汝德数相似,但是这样就无法满足风机叶片的推力相似,而风机运行产生的推力是影响海上浮式风力机耦合动态响应特征的关键因素,这样的模型实验显然不能很好的反应原型风力机的性能。在有一定缩尺比的模型实验时,为了满足推力相似,一种更为合适的思路是对叶片进行重新设计。因此,虽然模型实验是研究海上浮式风力机的普遍手段,但亦存在诸多技术难题,也是目前国际上海上风能应用研究的重点研究内容之一。

4.2 典型模型实验

由于模型实验的尺度效应以及经济性等方面的限制,目前为止对浮式风机系统的模型实验研究也十分有限。本文介绍一些与浮式风机相关的经典实验,以期数值模拟提供一定的参考和验证的依据,浮式风机模型实验的统计情况见表 2。

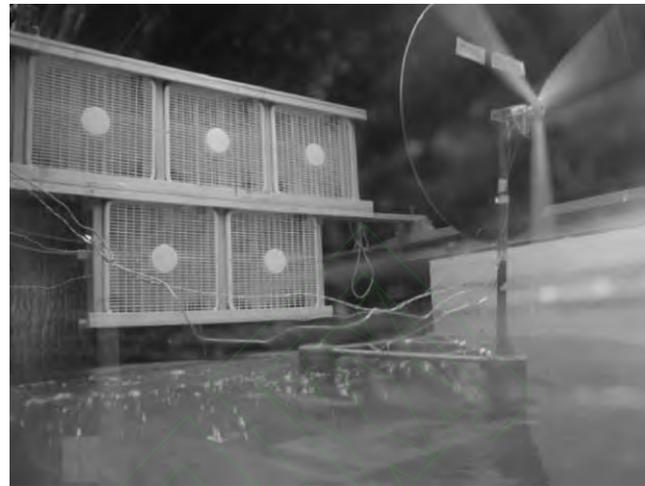
2009 年,日本京都大学(Kyoto University)在日本东京的国立海洋研究所(NMRI, National Maritime Research Institute)进行了 1:22.5 的 Spar 浮体的模型实验^[104]。该实验对平台的自由衰减,平台在规则波和非规则波中的响应问题分别进行了研究,同时还增加了一些将气动载荷简化为定常力作用在规则波中的平台上的模拟工况。

美国俄勒冈州的 Principle Power 公司在 2010 年在加州大学伯克利分校进行了 1:105 的一个半潜平台的模型实验^[93],在该实验中,风机受到的气动载荷由一个致动盘来代替,并用一个旋转质量来产生回转矩。

2011年^[105]，由缅甸大学带领的 DeepCWind 集团，在荷兰的 MARIN 水池开展了一系列的模型实验，这其中包含一个半潜式平台、一个张力腿平台还有一个 Spar 平台，均采用 1:50 的缩尺比，实验工况较多，包括自由衰减，规则波与不规则波中的响应，同时还包含了基于 NREL-5MW 风机的实验模型在工作状态下的风载荷。由于在 Froude 数相似下建立的模型无法保证 Reynolds 数的一致，因此最终并没有得到预期的结果。于是在 2013 年他们对风机叶片进行了重新设计，利用之前的半潜平台又重新进行了一次实验^[106]。



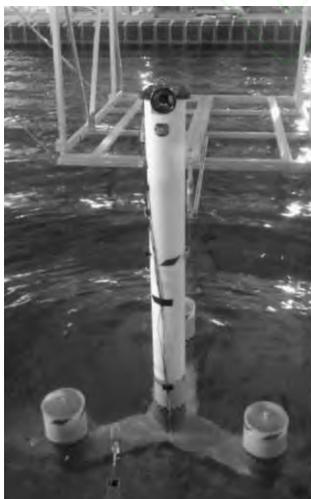
(a)Spar at NMRI^[104]



(b)WindFloat Semi-submersible^[93]



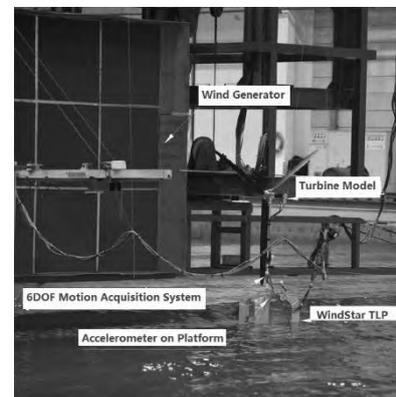
(c)DeepCWind^[105]



(d)Concrete Star^[109]



(e)MARINTEK Braceless^[111]



(f)WindStar TLP^[113]

图 9 部分模型实验示意图

Fig.9 Images of experiments

表 2 海上浮式风机模型实验统计表^[100]

Tab.2 Floating Offshore Wind Turbine Experiment Comparisons

Experiment Name	Scale	Testing Location	Platform Typr	Aerodynamic Setup
Spar at NMRI (2009)	1:22.5	NMRI	Spar	Steady Force
WindFloat (2010)	1:105	UC Berkeley	Semi-submersible	Actuator Disk + Rotating Mass
DeepCWind (2011)	1:50	MARIN	Semi-submersible, Spar, TLP	Full Rotor(Froude-Scaled)
DeepCWind, continued (2013)	1:50	MARIN	Semi-submersible	Full Rotor (Performance scaled)
Tension-Leg Bouy (2011)	1:100	MARINTEK	TLP, Spar	None
Tension-Leg Bouy (2014)	1:40	IFREMER	TLP	None
Concrete Star(2014)	1:40	ECN	Braceless Semi-submersible	Ducted-Fan
MARINTEK Braceless (2015)	1:30	MARINTEK	Braceless Semi-submersible	Novel Actuator
INNWIND.eu Model Test (2015)	1:60	ECN	10MW Semi-submersible	Ducted Fan and Froude-scaled Rotor
WindStar TLP(2016)	1:50	SJTU	WindStar TLP	Full Rotor

挪威生命科学大学和挪威能源技术研究院的一些科研人员于 2011 年^[107-109]建立了一个 1:100 的 TLP 平台模型和一个传统悬链线系泊下的 Spar 平台模型, 并在 MARINTEK 水池做了模型实验. 后于 2014 年又在法国海洋开发研究院(IFREMER)做了缩尺比为 1:40 的 TLP 平台的模型实验. 在这两组实验中, 都对平台的自由衰减、以及平台在规则波与非规则波中的水动力响应进行了实验模拟, 实验过程中并未考虑风机气动载荷的影响.

2014 年, 法国南特中央理工大学的水池做了一组无支柱的半潜平台(Concrete Star Wind Floater)的模型实验^[109]. 为了避免由于在 Froude 数相似下建立的叶片模型无法保证 Reynolds 数不匹配引起的问题, 这里风机叶片气动载荷用一个带有反馈控制的导管风扇模型来代替. 同时他们将实验数据与用 FAST 计算得到的结果进行了对比分析.

此外, OC4 DeepCWind 所采用的半潜平台的 1:60 的模型^[110]实验也在法国南特中央理工大学的水池完成. 但是在这组实验中, 这个半潜平台模型是作为 10MW 风机的支撑平台. 与之前的 Concrete Star Wind Floater 的模型实验的处理方法类似, 采用带有反馈控制的导管风扇模型用来模拟气动载荷的作用. 除了自由衰减实验、规则波与非规则波中的响应实验之外, 他们还做了极限海况下的浮式风机系统的响应实验.

2015 年在 MARINTEK 水池对无支架的半潜平台模型做了一系列的实验^[111], 在实验中, 他们用一系列与致动器相连接的张紧的线来代替导管风扇提供气动载荷. 他们同样也将实验结果与 FAST 软件计算得到的结果进行了比较.

上海交通大学海洋工程国家重点实验室于 2012 年提出一种新型多立柱张力腿式浮式风力机概念, WindStar TLP system^[112]. 并于 2016 年展开了一系列的水池模型实验^[113], 实验模型缩尺比为 1:50, 为解决实验中的尺度效应, 他们基于风力机推力相似设计模型叶片. 实验测定了风力机的空气动力, 平台的水动力, 得到模型在不同环境条件下所承载荷以及运动响应等, 为新型多立柱张力腿式浮式风机的进一步研究提供了可靠的参考依据.

由于浮式风机的研究刚起步不久, 实验研究方法也是处于不断摸索的阶段, 而且浮式风机系统的复杂性使得尺度效应问题变成实验的一大难点, 因此成熟的实验数据还比较少. 本文主要对于已有的一些

比较权威的实验进行了综述性的介绍, 目的是为数值计算以及今后进一步的实验研究提供一定的参考依据.

5 结语

海上浮式风机是对海上风能资源进行开发和利用的重要工具. 相比于陆上风机和浅海固定式风机, 海上浮式风机所受的环境载荷更加复杂, 这给海上浮式风机的设计研发带来了很大的挑战, 因此准确预报海上浮式风机所受到的各种环境载荷对于海上风机的设计发展有非常重要的意义. 本文针对海上浮式风机所受到的各种环境载荷的分析方法及研究现状进行介绍, 主要分为以下几个部分: 风机叶片气动力学问题、支撑平台水动力学问题、浮式风机系统气动力学-水动力学全耦合问题等的数值研究手段以及模型实验研究方法.

虽然海上浮式风机的概念提出的比较晚, 但是固定式风机的发展已经经过了很长一段时间, 并形成了相对成熟的气动力学分析的方法和理论. 因此, 在对海上浮式风机进行气动力学分析的过程中, 主要借鉴传统固定式风机气动力学分析的理论方法, 如叶素动量理论, 势流理论, 致动线模型, 以及计算流体力学 CFD 方法等, 文中对这些不同的数值模拟方法及研究进展展开了讨论.

同样, 在海洋工程领域, 对浮式平台的水动力性能预报的理论方法也被借鉴到海上浮式风机支撑平台水动力性能分析中. 文中分别对浮式支撑平台水动力研究中常用的几种方法及其研究现状进行了介绍, 主要包括: Morison 公式法、势流理论以及直接求解粘性流场的计算流体力学方法. 此外一些学者提出了更适用于海上浮式风电开发的新型浮式支撑平台, 文中也进行了简单介绍.

而在海上浮式风机的研究和设计中更大的难点在于浮式风机系统的气动力学-水动力的整体耦合上. 结合不同的叶片气动力学分析方法和平台水动力学分析方法, 学者们在气动力学-水动力学耦合问题上也取得了一些初步的成果. 目前主要的耦合方法还是基于叶素动量理论与势流理论相结合的方法, 在解决浮式风机全耦合的复杂问题上存在一定的局限性, 更加准确可靠的 CFD 数值模拟在耦合问题的研究上仍处于起步阶段. 考虑到浮式风机产业的发展需求, 在浮式风机的全耦合问题上未来还有很多工作要做, 这也是海上浮式风机发展所面临的一大挑战.

除了数值分析方法之外, 在浮式风机的耦合分析中, 模型实验也是十分重要的分析手段. 由于海上浮式风机研究起步较晚, 成功的实验经验比较匮乏; 同时浮式风机的模型要远比传统浮式平台模型复杂, 模型实验中面临着较难解决的尺度效应问题, 因此目前可供参考的模型实验还不是很多. 本文介绍了目前比较成功的海上浮式风机的模型实验, 希望对今后的数值研究提供一定的参考.

参考文献:

- [1] 张亮, 白勇. 海上风力发电[M]. 北京: 海洋出版社, 2012:168-176.
- [2] HERONEMUS W E. Pollution-free energy from offshore winds[C]// Proceedings of the 8th Annual Conference and Exposition Marine Technology Society, Washington D.C., September 11-13, 1972.
- [3] HANSEN M O L, SØRENSEN J N, VOUTSINAS S, et al. State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2006, 42(4):285-330.
- [4] GLAUERT H. Airplane propellers[M]. Berlin: Springer, 1935:169-360.
- [5] SHEN W Z, MIKKELSEN R, SØRENSEN J N, et al. Tip loss corrections for wind turbine computations[J]. Wind Energy, 2005, 8(4):457-475.
- [6] WHALE J, FISICHELLA C, SELIG M. Correcting inflow measurements from J3 AWTS using a lifting-surface code[J]. Urbana, 1999, 51:61.
- [7] HESS J L. Review of integral-equation techniques for solving potential-flow problems with emphasis on the surface-source method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1975, 5(2):145-196.

- [8] PREUSS R D, SUCIU E, MORINO L. Unsteady potential aerodynamics of rotors with applications to horizontal-axis windmills[J]. *AIAA Journal*, 1980, 18(4):385-393.
- [9] SNEL H, SCHEPERS J, NEDERLAND S E C. Joint investigation of dynamic inflow effects and implementation of an engineering method[M]. Netherlands Energy Research Foundation ECN, 1995:10-15.
- [10] SCHEPERS J, SNEL H, BUSSEL G V. Dynamic inflow: yawed conditions and partial span pitch control[M]. Netherlands Energy Research Foundation ECN, 1995:100-113.
- [11] SUCIU E O, MORINO L. Nonlinear steady incompressible lifting-surface analysis with wake roll-up[J]. *AIAA Journal*, 1977, 15(1):54-58.
- [12] SØRENSEN J N. Three-level viscous-inviscid interaction technique for the prediction of separated flow past rotating wing[D]. AFM-83-03, Technical University of Denmark. 1986.
- [13] SØRENSEN J N, SHEN W Z. Numerical modeling of wind turbine wakes[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(2):393-399.
- [14] TROLDORGBORG N, SØRENSEN J N, MIKKELSEN R. Actuator line simulation of wake of wind turbine operating in turbulent inflow[C]// *Journal of Physics: conference series*. IOP Publishing, 2007, 75(1):1-16.
- [15] LU H, PORTÉ-AGEL F. Large-eddy simulation of a very large wind farm in a stable atmospheric boundary layer[J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23(6):1-20.
- [16] CHURCHFIELD M J, LEE S, MICHALAKES J, et al. A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics[J]. *Journal of Turbulence*, 2012, 13:1-32.
- [17] CHURCHFIELD M J, LEE S, MORIARTY P J, et al. A large-eddy simulation of wind-plant aerodynamics[J]. *AIAA Paper*, 2012, 1:1-19.
- [18] 李鹏飞, 万德成, 刘建成. 基于致动线模型的风力机尾流场数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2016, 2:127-134.
- [19] 李鹏飞. 海上浮式风机尾流场模拟及耦合动力分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [20] 任年鑫. 海上风力机气动特性及新型浮式系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [21] 周胡, 王强, 万德成. 风机叶片三维绕流场数值模拟[C]// 第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源诞辰 110 周年纪念大会, 江苏无锡, 2012:627-636.
- [22] 周胡, 万德成. 不同叶片数的风力机绕流场的非定常流数值模拟[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2014, 29(4):444-453.
- [23] ZHOU H, WAN D C. Numerical investigations on the aerodynamic performance of wind turbine: Downwind versus upwind configuration[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2015, 14(1):61-68
- [24] 赵文超, 周胡, 万德成. 湍流模型对风力机叶片数值模拟的影响[C]// 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议, 浙江舟山, 2013:295-301.
- [25] 赵文超, 万德成. 海上浮式风力机叶片气动性能的数值模拟[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2014, 29(6):663-669.
- [26] 程萍, 万德成. 基于重叠网格法分析塔架对于风机气动性能的影响[C]// 全国水动力学研讨会, 2015.
- [27] CHENG P, WAN D C, HU C. Unsteady aerodynamic simulations of floating offshore wind turbines with overset grid technology[C]// *Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016*
- [28] 王丰, 刘德有, 曾利华, 等. 大型风电场风机最优布置规律研究[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(4):472-478
- [29] BURTON T, SHARPE D, JENKINS N, et al. *Wind energy handbook*[M]. 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2001:15-18.
- [30] JIN W J. Numerical simulation of wind turbine wakes based on actuator line method in NEK5000[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2013.
- [31] ELLIOTT D L, BARNARD J C. Observations of wind turbine wakes and surface roughness effects on wind flow variability[J]. *Solar Energy*, 1990, 45(5):265-283.

- [32] 贺德馨. 专家讨论 2020 年中国的科学和技术发展研究——风能技术[J]. 科技和产业, 2004, 1:36-36.
- [33] SPERA D A. Wind turbine technology: Fundamental concepts of wind turbine engineering[M]. New York, USA: ASME press, 2009.
- [34] THOMSEN K, SORENSEN R. Fatigue loads for wind turbines operating in wake[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80:121-136
- [35] KATIC I, HØJSTRUP J, JENSEN N O. A simple model for cluster efficiency[R]. European Wind Energy Association Conference and Exhibition, 1986.
- [36] AINSLIE J F. Calculating the flowfield in the wake of wind turbines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 27(1):213-224.
- [37] LARSEN G C, MADSEN H A. Wind field in wakes[R]. 1996.
- [38] MONTAVON C, JONES I, STAPLES C, et al. Practical issues in the use of CFD for modelling wind farms[C]// European Wind Energy Conference, 2009.
- [39] WHALE J, ANDERSON C G, BAREISS R, et al. An experimental and numerical study of the vortex structure in the wake of a wind turbine[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84(1):1-21.
- [40] VERMEER L J, SØRENSEN J N, CRESPO A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39(6):467-510.
- [41] FRANDBSEN S T, JØRGENSEN H E, BARTHELMIE R, et al. The making of a second-generation wind farm efficiency model complex[J]. Wind Energy, 2009, 12(5):445-458.
- [42] CHOI N J, SANG H N, JEONG J H, et al. CFD Study on aerodynamic power output changes with inter-turbine spacing variation for a 6MW offshore wind farm[J]. Energies, 2014, 7(11):7483-7498.
- [43] CHOI N J, SANG H N, JEONG J H, et al. Numerical study on the horizontal axis turbines arrangement in a wind farm: Effect of separation distance on the turbine aerodynamic power output[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 117:11-17.
- [44] 田琳琳, 赵宁, 钟伟. 风力机尾流相互干扰的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2012, 33(8):1315-1320.
- [45] 李少华, 王东华, 岳巍澎, 等. 双风力机风向变化时尾流及阵列数值研究[J]. 动力工程学报, 2011, 31(10):768-772.
- [46] 张玲, 邹永, 黄鹏杰. 水平轴风力机多机组阵列的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5):1133-1138.
- [47] CHURCHFIELD M J, LEE S, MORIARTY P J, et al. A large-eddy simulations of wind-plant aerodynamics[C]// 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012.
- [48] CHURCHFIELD M J, LEE S, MICHALAKES J, et al. A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics[J]. Journal of Turbulence, 2012, 13(13):1-32.
- [49] CHURCHFIELD M, LEE S. NWTC design codes-SOWFA[J]. URL: <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/SOWFA>, 2012.
- [50] FLETCHER T M, BROWN R E. Simulation of wind turbine wake interaction using the vorticity transport model[J]. Wind Energy, 2010, 13(7):587-602.
- [51] MIKKELSEN R, SØRENSEN J N, ØYE, STIG, et al. Analysis of power enhancement for a row of wind turbines using the actuator line technique[J]. Journal of Physics, 2007, 75(1):1-8.
- [52] TROLDORGBORG N, LARSEN G C, MADSEN H A, et al. Numerical simulations of wake interaction between two wind turbines at various inflow conditions[J]. Wind Energy, 2011, 14(7):859-876.
- [53] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61400-1: Wind turbines part 1: Design requirements[R]. International Electrotechnical Commission, 2005.
- [54] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61400-3[R]. Wind Turbines-Part, 2009.
- [55] MORISON J R, JOHNSON J W, SCHAAF S A. The force exerted by surface waves on piles[J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5):149-154.
- [56] CHENG P W. A reliability based design methodology for extreme responses of offshore wind turbines[D].

- TU Delft, Delft University of Technology, 2002.
- [57] ZAAIJER M B. Foundation modelling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines[J]. *Applied Ocean Research*, 2006, 28(1):45-57.
- [58] RAINEY R C T. A new equation for calculating wave loads on offshore structures[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 204:295-324.
- [59] 阮胜福, 唐友刚. 海上风电浮式基础动力响应研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [60] 何江贤. 系泊式新能源平台水动力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [61] WAYMAN E, SCLAVOUNOS P. Coupled Dynamic modeling of floating wind turbine systems[C]// 2006 Offshore Technology Conference, Texas, USA, May, 2006.
- [62] WAYMAN E. Coupled dynamics and economic analysis of floating wind turbine systems[D]. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [63] BROMMUNDT M, KRAUSE L, MERZ K, et al. Mooring system optimization for floating wind turbines using frequency domain analysis[J]. *Energy Procedia*, 2012, 24:289-296.
- [64] KARIMIRAD M, MOAN T. A simplified method for coupled analysis of floating offshore wind turbines[J]. *Marine Structures*, 2012, 27(1):45-63.
- [65] ZHANG R, TANG Y, HU J, et al. Dynamic response in frequency and time domains of a floating foundation for offshore wind turbines[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 60:115-123.
- [66] BREDMOSE H, JACOBSEN N G. Breaking wave impacts on offshore wind turbine foundations: focused wave groups and CFD[C]// ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2010, 397-404.
- [67] BREDMOSE H, JACOBSEN N G. Vertical wave impacts on offshore wind turbine inspection platforms[C]// ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2011:645-654.
- [68] WU C K, NGUYEN V. Aerodynamic simulations of offshore floating wind turbine in platform-induced pitching motion[J]. *Wind Energy*, 2017, 20:835-858.
- [69] 周胡. 海上风力机气动与水动流场数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [70] ZHAO W C, WAN D C. Numerical study of interactions between phase II of OC4 wind turbine and its semi-submersible floating support system[J]. *Journal of Ocean and Wind Energy*, 2015, 2(1):45-53.
- [71] CHENG P, WAN D C. Hydrodynamic analysis of the semi-submersible floating wind system for phase II of OC4[C]// Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21-26, 2015:346-353.
- [72] TRAN T T, KIM D H. The coupled dynamic response computation for a semi-submersible platform of floating offshore wind turbine[J]. *Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147:104-119.
- [73] DUNBAR A J, CRAVEN B A, PATERSON E G. Development and validation of a tightly coupled CFD/6-DOF solver for simulating floating offshore wind turbine platforms[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 110:98-105.
- [74] CERMELLI C, RODDIER D. MINIFLOAT: A novel concept of minimal floating platform for marginal field development[C]// JS C, K I, M S, et al. The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference ISOPE 2004. Toulon, 2004:538-545.
- [75] ZAMBRANO T, MACCREADY T, KICENIUK J T, et al. Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in Gulf of Mexico storm conditions[C]// 25TH International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2006. Hamburg, 2006.
- [76] WITHEE J E. Fully coupled dynamic analysis of a floating wind turbine system[D]. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [77] LEE K H. Responses of floating wind turbines to wind and wave excitation[D]. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [78] JONKMAN J M, MATHA D. Dynamics of offshore floating wind turbines-analysis of three concepts[J].

- Wind Energy, 2011, 14(4):557-569.
- [79] MATHA D, HAUPTMANN S, HECQUET T, et al. Methodology and results of loads analysis of wind turbines with advanced aeroelastic multi-body simulation[C]// Ger Wind Energy Conference (DEWEK 2010), Bremen, Germany. 2010.
- [80] MATHA D. Model development and loads analysis of an offshore wind turbine on a tension leg platform with a comparison to other floating turbine concepts: April 2009[R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2010.
- [81] JONKMAN J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine[M]. ProQuest, 2007.
- [82] TRAN T, KIM D, SONG J. Computational fluid dynamic analysis of a floating offshore wind turbine experiencing platform pitching motion[J]. Energies, 2014, 7(8):5011-5026.
- [83] VAAL J B, HANSEN M O, MOAN T. Effect of wind turbine surge motion on rotor thrust and induced velocity[J]. Wind Energy, 2014, 17:105-121.
- [84] 周胡, 赵文超, 万德成. 非均匀风影响下风力机三维气动粘性流场的数值模拟[J]. 海洋工程, 2015, 33(1):90-99.
- [85] LI P F, CHENG P, WAN D C. Numerical simulations of wake flows of floating offshore wind turbines by unsteady actuator line model[C]// Proceedings of the 9th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics. Glasgow, UK. 2015.
- [86] CHENG P, WAN D C, HU C H. Unsteady aerodynamic simulations of floating offshore wind turbines with overset grid technology[C]// Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2016), Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016:391-398.
- [87] NIELSEN F G, HANSON T D, SKAARE B. Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [88] KIM S, SCLAVOUNOS P D. Fully coupled response simulations of theme offshore structures in water depths of up to 10,000 Feet[C]// Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 17-22 June 2001, Stavanger, Norway, The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2001.
- [89] KIM S. SWIM 2001: Frequency-domain analysis of offshore platforms, User manual[R]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2004.
- [90] KIM S. MOTION 2001: Time-domain response analysis of offshore platforms, User manual[R]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2004.
- [91] KIM S. LINES 2001: Nonlinear Static & Dynamic Analysis of Mooring Line/Riser/Tether Arrays, User Manual[R]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2004.
- [92] SEBASTIAN T, LACKNER M A. Characterization of the unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines[J]. Wind Energy, 2013, 16(3):339-352.
- [93] RODDIER D, CERMELLI C, AUBAULT A, et al. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2010, 2(3):93-104.
- [94] NEMATBAKHSH A, OLINGER D J, TRYGGVASON G. A Nonlinear computational model for floating wind turbines[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 135(1):1091-1100.
- [95] 李鹏飞, 万德成, 刘建成. 基于致动线模型的风力机尾流场数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(2):127-134.
- [96] LI P F, WAN D C, HU C H. Fully coupled dynamic response of a semi-submerged floating wind turbine system in wind and waves[C]// Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference(ISOPE2016), Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016:273-281.
- [97] ROBERTSON A, JONKMAN J, VORPAHL F, et al. Offshore code comparison collaboration continuation within IEA wind task 30: Phase II results regarding a floating semisubmersible wind system[C]// Proceedings

- of the 33rd international conference on ocean, offshore and Arctic engineering, San Francisco, CA, USA, 8-13 June 2013.
- [98] QUALLEN S, XING T, CARRICA P, et al. CFD simulation of a floating offshore wind turbine system using a quasi-static crowfoot mooring-line model[C]// International Ocean and Polar Engineering Conference, 2013:143-152.
- [99] CRUZ J, ATCHESON M. Floating offshore wind energy[M]. Springer International Publishing, 2016.
- [100] STEWART G, MUSKULUS M. A review and comparison of floating offshore wind turbine model experiments[J]. Energy Procedia, 2016, 94:227-231.
- [101] 杨建民, 肖龙飞, 盛振邦. 海洋工程水动力学试验研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [102] ROBERTSON A N, JONKMAN J M, GOUPEE A J, et al. Summary of conclusions and recommendations drawn from the DeepCWind scaled floating offshore wind system test campaign[C]// ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2013.
- [103] FOWLER M J, KIMBALL R W. Design and testing of scale model wind turbines for use in wind/wave basin model tests of floating offshore wind turbines[C]// Proceedings of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2013.
- [104] UTSUNOMIYA T, SATO T, MATSUKUMA H, et al. Experimental validation for motion of a spar-type floating offshore wind turbine using 1/22.5 scale model[C]// ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2009:951-959.
- [105] MARTIN H R. Development of a scale model wind turbine for testing of offshore floating wind turbine systems[D]. Maine Maritime Academy, 2011.
- [106] KOO B J, GOUPEE A J, KIMBALL R W, et al. Model tests for a floating wind turbine on three different floaters[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(2):020907.
- [107] MYHR A, MAUS K J, NYGAARD T A. Experimental and computational comparisons of the OC3-HYWIND and Tension-Leg-Buoy (TLB) floating wind turbine conceptual designs[C]// The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.
- [108] MYHR A, NYGAARD T A. Experimental results for tension-leg-buoy offshore wind turbine platforms[J]. Journal of Ocean Wind Energy, ISOPE, 2014, 1(4):217-224.
- [109] AZCONA J, BOUCHOTROUCH F, GONZÁLEZ M, et al. Aerodynamic thrust modelling in wave tank tests of offshore floating wind turbines using a ducted fan[C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2014, 524(1):012089.
- [110] SANDNER F, AMANN F, AZCONA J, et al. Model building and scaled testing of 5MW and 10MW semi-submersible floating wind turbines[C]// EERA DeepWind 2015 Conference, Trondheim, Norway, 2015.
- [111] SAUDER T, BACHYNSKI E. MARINTEK Ocean Energy Review: Experimental Modelling of wind loads on offshore wind turbines in wave tanks[R]. Tech. Rep.3; Norwegian Marine Technology Research Institute, MARINTEK; 2014.
- [112] ZHAO Y, YANG J, HE Y. Preliminary design of a multi-column TLP foundation for a 5-MW offshore wind turbine[J]. Energies, 2012, 5:3874-3891.
- [113] 赵永生, 杨建民, 何炎平, 等. 新型多立柱张力腿式浮动风力机概念模型试验研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(12):124712.