

海上浮式风力机及其动力学问题*

朱仁传, 缪国平, 范菊, 刘桦

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 深水风资源更为丰富,随着科技进步风电场正逐步向水深百米及以上的海域发展.针对海上浮式风力机、浮式基础以及系泊系统作业时,受到风浪流等的联合作用,就不同海上浮式风力机形式及其典型结构对应的气动载荷、水动力载荷,浮式风力机系统与环境动力的耦合问题、处理方法和可能的发展方向作了简要的评述.充分考虑作业背景的环境流场和风力机尺度,针对不同的流动特征综合各种理论方法和计算手段,更为准确地进行空气动力学-水动力学-控制系统-结构耦合分析是研究的难点和发展方向.

关键词: 海上风电; 浮式风力机; 耦合; 动力学

中图分类号: O352 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.011

引 言

风能是绿色清洁的可再生能源,经过数十年的研究开发,陆地风能与近海风能的开发都取得了令人瞩目的进展.海上风电优势独特,风场广阔风力稳定、风电机组单机容量可以更大、受噪音标准限制小,能够节约土地资源,利于实现规模化,可降低风力发电的成本^[1].

海上风电有其特殊的技术难点.海上风能开发面临的环境条件十分复杂,必须要考虑风、浪、流等主要气象、水文要素对风电机设施的作用和载荷,对浮式风力机系统还必须考虑其运动特性和定位要求,冰区海域还应充分考虑海冰的因素.系统长期稳定运行需要解决维护保养带来的一系列技术问题.我国丰富的海上风资源主要集中在水深 30 m 以上的海域,在此水深下固定式海上风力机结构系统的经济性显著下降.当前各国建设的风电场逐步向水深百米甚至几百米的海域发展,浮式风力机的研发也进展迅速,具有代表性的是美国可再生能源实验室(national renewable energy laboratory, NREL)所提出的 5 MW 半潜式浮式海上风力机平台^[2]和 2009 年挪威在北海水深 220 m 水域建成的世界上第一座 2.3 MW 的浮式海上风力机平台.

海上浮式风力机是海洋工程装备设计研发的重要拓展领域,但其不同于传统的海洋工程装备,海上风力机的整体结构高,承受了更大的风载、更多的动态响应、更高的非线性响应.论文针对海上浮式风力机不同形式和特点,结合海洋工程水动力学研究和对国内外研究进展的认识,就海上浮式风力机系统及其相关的动力学问题、关键技术和可能的发展作一简要的

* 收稿日期: 2013-07-18; 修订日期: 2012-09-26

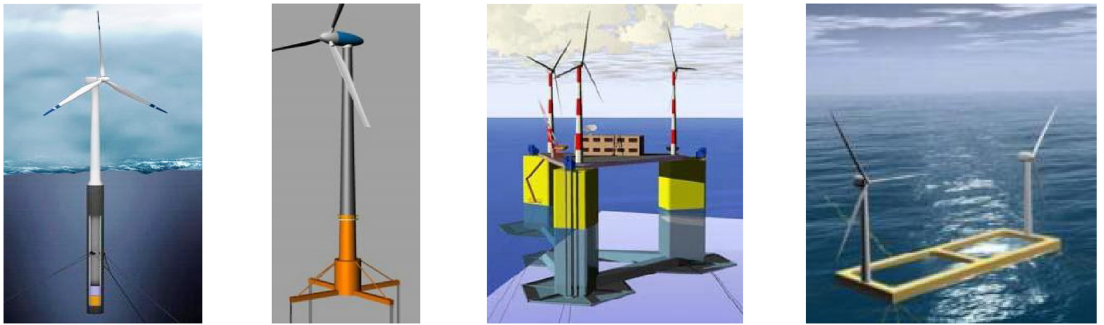
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2014CB046200)

作者简介: 朱仁传(1969—),男,合肥人,教授,博士,博士生导师(通讯作者. Tel: +86-21-34204288; E-mail: renchuan@sjtu.edu.cn).

评述。

1 海上浮式风力机基础形式

海上浮式风力机的基础主要有固定式和浮式两种类型,浅海采用固定式基础,水深大于 60 m 的海域适合采用浮式基础。不同于陆上风力机,海上风力机结构复杂,基础结构的性能直接影响到风力机运行的稳定性和可靠性。海上浮式风力机系统主要由风力机、浮式基础和系泊系统组成。最早对风机浮式基础进行详细研究是英国公司 Garrad Hassan,1994 年他们对悬链线系泊的 Spar 平台上设置单涡轮风机的方案进行了评价^[3],研究涉及到风机型式、系泊方式等。后来意大利、美国、挪威相继开展了相关的研究。目前研究较多的浮式风机基础主要有 Spar 结构基础、张力腿结构基础(tension leg platform, TLP)、半潜式结构基础和浮筒(或驳船)基础。如图 1 所示:(a) Spar 结构基础,通过压载舱使得整个结构系统的中心压低至浮心之下以保证风机的稳定,通过辐射状的系缆来保持风机的位置。(b) TLP 结构基础,剩余浮力提供给张力筋腱一定的预张力来保持风机的稳定。(c) 半潜式结构基础,依靠自身重力和浮力的平衡及系缆回复力来保证风机的稳定。(d) 浮筒(或驳船)基础。采用驳船平台比钢管平台具有搭建简单、定位容易、投资少、受水位影响较小的优点,同时驳船平台拼装工艺简单,工期较短。



(a) Spar 结构基础 (b) TLP 结构基础 (c) 半潜式结构基础 (d) 浮筒式基础
(a) Spar-type foundation (b) TLP foundation (c) Semi-submersible foundation (d) Pontoon-type foundation

图 1 4 种主要形式的海上风力机浮式基础

Fig.1 Four types of floating foundations for offshore wind turbines

随着海上风电的研究工作不断深入,出现了多种新颖的浮式基础。如:TLP 基础的 Blue H 海上风力发电机、同时采用系缆和张力筋腱定位成为 Spar/TLP 混合结构基础的 SWAY 海上风电机组,以及单一半潜式基础支持多个风电机组的 WindSea 海上风电机组^[4-6]等等,相继被提出和测试。2013 年秋日本进行新型海上风车和潮汐发电的混合发电装置的实证试验。

2 海上浮式风力机环境与结构载荷

海上浮式风力机系统除承载有陆上风力机相同的风载荷外,浮式基础还承载波浪海流等海洋环境荷载,其承载形式与基础特点也不同于海洋石油平台。风浪流对浮式风力机系统的联合作用,以及浮式风力机系统动力响应涉及的动力-空气动力-水动力-结构动力耦合问题是浮式风力机技术研究的难点,也是海上风力发电研究的热点。实际海洋环境中,风浪流的方向和大小瞬息变化,准确地描述环境参数并计算出相应的环境载荷,是评估浮式风力机系统载荷和运动响应特性的关键。

2.1 风载荷

对于浮式风力机系统的风力机、含塔架的浮式基础水上结构主要受风的作用。假定风向平行于水平面,不存在垂向的风速分量,则瞬时风速 $u(z, t)$ 可分解为平均风速和脉动风速两部分。

2.1.1 平均风速与脉动风速

受海面粗糙度的影响,平均风速沿高度存在变化,该变化规律为平均风速梯度或者风剖面。平均风速沿高度的变化规律一般可用指数律或对数律来描述。

指数律

$$u(z) = u_r (z/z_r)^\alpha, \quad (1)$$

式中, z 为海平面以上高度; $u(z)$ 为 z 高度处的平均风速; z_r 为海平面以上参考高度,一般取为 10 m; u_r 为参考高度处的平均风速; α 为风剖面指数,表示海面粗糙度,海面越粗糙其值越大。

对数律

$$u(z) = u_r \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln z_r - \ln z_0}, \quad (2)$$

式中, z_0 为平均风速等于 0 时对应的高度。

众所周知脉动风速是平稳随机过程,且均值为 0。脉动风速常用阵风谱来表示,风谱模型主要有平均风向和垂直于平均风向的两种阵风谱。平均风向上的风速变化可以用 Harris 阵风谱, Wills 阵风谱, Slettringen 阵风谱, Davenport 阵风谱, ISO 19901-1 (NPD) 阵风谱或 API (American petroleum institute) 阵风谱等风谱描述^[7-8]。

2.1.2 风载荷计算

风载荷有塔架风载荷与风力机载荷。动量叶元体理论方法,简单实用,被广泛用于工业风力机的性能评估和空气动力载荷的预测分析。该方法结合了动量守恒和叶元体理论,前者从宏观的角度,通过守恒定律得出风轮载荷;后者却着眼于局部,通过升力和阻力得出风轮载荷,最后使两项载荷相等并求解方程;进一步结合描述风速的正常湍流模型和叶片攻角修正方法,可以获得风机的风载荷。Ye 等^[9]采用升力线方法与面元方法相结合的模拟方法,三维数值模拟了某种风力机叶片,所得叶片的最大输出功率与实验数据吻合较好。随着计算流体力学 (computational fluid mechanics, CFD) 和计算机技术的发展,采用湍流模型和动网格技术的 CFD 模拟方法被应用于求解风力机的风载荷,相较于前面所述方法,CFD 模拟计算相当耗时。

目前考虑浮式风力机浮基系统的整体运动时,一般采用简便方法,如 Knauer 等^[10]采用以下公式计算作用于浮式风机叶片上的推力 F_T :

$$F_T = \frac{1}{2} \rho_a A U_r^2 C_T(U_r), \quad (3)$$

式中, ρ_a 为空气密度, A 为叶片扫过的总面积, C_T 为风机叶片的推力系数, U_r 为来风与风机的相对速度。如果替换式(3)中的推力系数为阻力系数,则可用于浮基上塔架的风载荷计算。

2.2 浮式基础的波流载荷

海上浮式风力机系统的浮式基础不同,波流作用下的水动力特性也不一样。从浮基水下结构的特征尺度来说,相比于波长,典型结构主要分为细长杆件和大尺度浮体两种,其在波浪或海流作用下的水动力载荷特征并不一样。如振荡流中的圆柱,需要根据雷诺数 (Reynolds number)、 $N_{KC} = U_M T/D$ (Keulegan-Carpenter 数) 来判断水波所引起结构物上非定常载荷的相似性变化,其中 U_M 为最大速度, T 振荡周期, D 圆柱直径。一般认为:小于 10 的 N_{KC} 越小惯性力趋于

重要;高于 15 的 N_{KC} 越大粘性力趋于重要;当 N_{KC} 大于 5,升力成分变得重要;对于具有细长杆件形状的水下结构,不能忽略其粘性力,而有的半潜式平台浮基, N_{KC} 约为 1 左右,波浪力占主要成分.因此尺度不同,相关载荷计算方法不尽相同.

2.2.1 细长杆件上的流体的载荷

对于小直径管柱或系泊锚链,可用 Morison 公式来计算流体作用力,其表达式为

$$F(t) = \frac{\rho \pi D^2}{4} \frac{dU(t)}{dt} C_M + \frac{\rho D}{2} C_D(z) U(t) |U(t)|, \tag{4}$$

$F(t)$ 为作用于 z 处的水平力, D 为直径, ρ 为流体密度, C_M 为质量力系数, C_D 为拖曳力系数, $U(t)$ 为水平方向水分子速度.均匀流和波浪中细长杆件均可采用式(4)计算.

如果浮基水下结构中小直径管柱的受力为主,则必须考虑高阶波浪载荷,各国的规范中常常推荐使用五阶 Stokes 波浪理论来计算波浪载荷,其中五阶波浪的速度势表达式可由摄动理论推导,详见文献[11]第五章.

不规则波浪中细长杆件的波浪载荷的计算,一般先将波能谱分布按频率进行分解,在此基础上各频率规则波浪载荷叠加计算可得.

对于海流中的细长构件,还应该考虑周期性的漩涡脱落引起的涡激振动的影响.众所周知,圆柱绕流漩涡脱落的频率 $f_s = Sr \cdot U/D$ (U 为海流速度, D 为圆柱直径, Sr 为 Strouhal 数,是 Re 数与结构截面形状等物理量的无量纲相似准数),当漩涡脱落频率与圆柱形结构的固有频率接近时,会在垂直于来流方向上产生很严重的横向振动.结构振动可使漩涡增强,阻力增加,振动会迫使漩涡脱落频率固定在结构固有频率附近.涡激振动不利于单柱形浮基的风力机作业,设计时应考虑海流的影响,避免共振.

2.2.2 大尺度浮式基础的波浪载荷

大尺度浮式风力机基础的波浪载荷与海洋平台的计算方法相同,目前主要采用三维势流理论方法,根据浮体形状特点,辅之以必要的系统粘性阻尼修正.海上风力机浮式基础的线性波浪载荷考虑为浮基不动时遭遇的入射波浪力、绕射波浪力,以及由浮基振荡产生的辐射波浪力三者之和.

假定流体无粘不可压,流动无旋,流动速度势满足 Laplace 方程,在浮体表面速度满足不可穿透条件,自由表面分别有非线性的动力学和运动学条件,在无穷远处需满足辐射条件.速度势 ϕ 可分解为 $\phi = \phi_I + \phi_R + \phi_D$, ϕ_I 为入射波速度势, ϕ_R 为辐射势, ϕ_D 为绕射势,势流理论方法求解浮基的辐射、绕射问题,是直接求解关于速度势 Laplace 方程的初边值问题,如辐射势 ϕ 满足如下的定解问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} [L]: \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0, \\ [F]: \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \\ [S]: \frac{\partial \phi}{\partial n} = \dot{\xi}_k(t) \mathbf{n}_k, \\ [B]: \phi, \frac{\partial \phi}{\partial n}, \nabla \phi \rightarrow 0, R \rightarrow \infty, \\ [I]: \phi = 0, \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0, t = 0, \end{array} \right. \tag{5}$$

其中, $\partial/\partial n$ 为关于沿船体表面内法向的偏导数; $\dot{\xi}_k(t)$ 表示船体六自由度的运动速度; \mathbf{n}_k 为 k 模态的单位法向矢量。

此方程的求解一般采用格林(Green)函数法,如基于频率势流理论方法,利用格林第三公式有

$$C(p)\phi(p) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \left(G(p, q) \frac{\partial \phi(q)}{\partial n_q} - \phi(q) \frac{\partial G(p, q)}{\partial n_q} \right) dS_q, \quad (6)$$

其中, $p(x, y, z)$ 为场点, $q(\xi, \eta, \zeta)$ 为源点, $C(p)$ 为固体角, $G(p, q)$ 为满足自由面条件、远方辐射条件和水底条件的格林函数, S_B 为浮体表面。

$$G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 2kPV \int_0^\infty \frac{1}{m-k} e^{m(z+\zeta)} J_0(mR) dm - 2k\pi i e^{k(z+\zeta)} J_0(kR), \quad (7)$$

$R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$, $r = \sqrt{R^2 + (z-\zeta)^2}$, $r_1 = \sqrt{R^2 + (z+\zeta)^2}$, $J_0(x)$ 为 Bessel 函数。求解边界积分方程(6)可得辐射势和绕射势。无论是线性频域还是时域理论以及具体求解方法都较成熟,可参见文献[11]。通过伯努利(Bernoulli)方程并进一步沿浮体表面 S_B 积分可得相应方向上的流体动力(或力矩):

$$F_i = -\rho \iint_{S_B} \frac{\partial \phi}{\partial t} n_i dS. \quad (8)$$

波浪与浮体相互作用时,一般最多考虑到二阶速度势,二阶势的稳定部分称为平均漂移力,可以将其作为静态力处理。平均漂移力是由二阶速度势理论引出来的,其理论表达式中只含有一阶速度势,一般得到一阶速度势后,可以直接求解获得平均漂移力。如采用近场计算波浪慢漂力,积分表达式为

$$F_i^{\text{drift}} = \frac{\rho g}{2} \int_{\text{WL}} \zeta_r^2 n_i dl + \frac{\rho}{2} \iint_{S_B} |\nabla \phi|^2 n_i dS + \rho \iint_{S_B} \left| x \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|^2 n_i dS,$$

式中 WL, ζ_r 分别为水线面和相对波高。随机波浪载荷是建立在波谱按频率分解基础上的各频率规则波浪载荷的叠加。

对于典型浮式风力机,浮式基础形式不同,流体作用下的性能各异, Spar 型基础重心低于浮心,浮式基础的吃水深,且垂向波浪激励力小、垂荡运动小,因此 Spar 型浮式基础较半潜式基础具有更好的垂荡性能,但 Spar 型浮式基础的水线面对稳定性的贡献小,其横摇和纵摇值较大,设计还必须考虑作业海域海流诱导的涡激振动问题。TLP 型浮式基础具有良好的垂荡和摇摆运动特性,但张力系泊系统复杂,张力筋腱的张力受海流影响大,上部结构和系泊系统的频率易发生共振运动。半潜式基础的吃水浅,在运输和安装时具有良好的稳定特性。

2.3 系泊

系泊系统是海上浮式结构整体设计中不能忽视的重要环节。电缆、立管系统也是海洋石油开采和风电场建设中的重要系统之一。它们的共同特点是极度细长、富有挠性,属于小尺度管柱。流体动力载荷中必须计入流体的粘性影响,包括柱后涡泄出,对波浪场的影响可以忽略。通常认为系泊缆索不能传递弯矩和剪力,而立管则必须考虑弯矩和剪力。

系泊系统的静力分析是研究在平衡状态下的系缆形状和张力。静力分析方便、快捷,多在设计初期采用。系泊系统的动力分析是研究在复杂环境载荷作用下系泊系统的动力响应,以判断所设计的系统是否满足定位要求以及系缆张力是否在允许范围之内等。

缆索的动力分析根据运动特性的不同可分为频域法和时域法两类。频域法又称为摄动法,求解时将所有的非线性项都进行线性化,并认为动态量是静力平衡位置上的摄动小量,而质量、附加质量、刚度等不变;而时域法在模型化时考虑所有的非线性,在每一个时间节点上,对每一个质量项、阻尼项、刚度项和载荷项都重新进行计算。缆索动力分析的时域方法主要有多刚体法、集中质量法和有限单元法等。其中集中质量法和有限元法应用较广。多刚体法可以近似地模拟缆索的几何构形,同时保持原系统的质量分布特性;集中质量法将所有外力集中于结点,结点之间通过弹簧连接,在计算包含重块或浮标的锚泊线或质量分布不均匀的锚泊线上时,具有天然的优势;而有限单元法使用有限单元模拟挠性部件的几何构形及张力分布,在连续性及求解精度上优势明显。

将系缆进行离散,可以得到空间离散有限元系统的动力平衡方程^[11]:

$$\mathbf{R}^I(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) + \mathbf{R}^D(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) + \mathbf{R}^S(\mathbf{r}, t) = \mathbf{R}^E(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t), \quad (9)$$

式中, \mathbf{R}^I 为惯性力,包括系缆质量和附加质量力; \mathbf{R}^D 为阻尼力,包括结构内部阻尼和水动力阻尼; \mathbf{R}^S 为系缆内部反作用力,即系缆张力; \mathbf{R}^E 为激励,包括系缆的重力、浮力、浮式结构物运动产生的强迫位移、波浪载荷和海流载荷以及任意节点处指定的外力;此处 \mathbf{r} , $\dot{\mathbf{r}}$ 和 $\ddot{\mathbf{r}}$ 分别为系缆单元的位移、速度和加速度。上式为一般通用表达,若是非线性问题则涉及的非线性项,则主要包括:缆索的几何非线性、材料非线性、非线性边界条件及非线性的外载荷。时域有限元法适用范围广、精度高,近年来得到较快的发展和广泛的应用,Chen^[12]详细论述了结构物和系泊系统的非线性相互作用,并建立了一个六自由度有限元数值模型,通过比较单点系泊振荡模型和系泊结构物水池试验的数值模拟和试验结果,验证了模型可靠性,并对该数值模型进行了一系列的应用和研究。袁梦等^[13]推导了任意材料非线性关系的锚泊线有限元控制方程,比较了3种常用系泊缆的系泊性能。

3 浮式风力机和风浪流相互作用的耦合动力分析

浮式风力机系统动力分析的难点,主要体现在风浪流对浮式风力机系统的联合作用,以及浮式风力机系统动力响应涉及的空气动力-水动力-结构动力耦合问题。相同风浪流联合的环境流场,与样式不一、尺度不同的浮式风力机基础相互作用后的流动特征,有的呈理想流体的流动特征,有的则粘性影响显著;同一个浮式风力机系统,在正常作业下的状态描述方法和在恶劣海况下动力分析方法及手段大相径庭。即使是采用 CFD 方法,水气两相流场的计算范围划分、波浪环境的生成、非线性特征计算的稳定性、风力机和浮基动力计算的尺度换算、计算网格数量,CFD 时间步长与波浪周期,特别是随机波浪作用计算的时间问题及相关矛盾等等,仍有待于研究和克服,至今还没有一个系统有效的万能分析方法来处理。当前正在探索的方法是根据不同的流动特征,采用各种不同理论和手段的组合,进行不同工况下浮式风力机系统与风浪流的耦合动力分析。

总的来说风作用下的浮式风力机与水上结构受力分析方法类似,主要是水下结构形状不同带来的水动力处理方法不一样。水下结构是细长杆件为主要特征的,计算处理相对简单,而具有大尺度浮式基础的风力机系统,波浪中运动的浮式基础所受到阻尼具有记忆特性,其在风浪流联合以及系缆作用下的时域运动方程可表示为^[14]

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{kj} + A_{kj}(\infty)) \ddot{\xi}_j(t) + \int_{-\infty}^t \dot{\xi}_j(\tau) K_{kj}(t - \tau) d\tau + B_{v,kj} \dot{\xi}_j(t) + C_{kj} \xi_j(t) \right\} =$$

$$F_j(t) + F_j^W(t) + F_j^C(t) + F_j^M(t), \quad k = 1, 2, \dots, 6, \quad (10)$$

式中, M_{kj} 为广义浮式基础的质量(含转动惯量), $B_{v_{kj}}$ 为系统粘性阻尼系数, C_{kj} 为回复力系数; $A_{kj}(\infty)$ 为无穷大频率所对应的广义附加质量, $K_{kj}(\tau)$ 为时延函数, 无穷大频率附加质量和时延函数可由线性频域附加质量和阻尼通过傅里叶(Fourier)逆变换快速计算获得, 也可以直接解时域方程获得; $F_j(t)$ 为遭遇的波浪载荷, 含二阶波浪力, 如果计算随机波浪力, 可通过波谱分解并叠加产生; $F_j^W(t)$ 为风载荷, 由平均风速和脉动风速引起, 对阵风谱做傅氏变换可以得到脉动风速的时间序列; $F_j^C(t)$ 为海流载荷, 通常作为定常力; $F_j^M(t)$ 为系泊系统对结构物的作用力, 动态分析计算可将系列缆索离散为多个单元的运动并作为未知数放到方程左端进行具体迭代计算, 时域方程的计算常用 Newmark- β 和龙格库塔(Runge-Kutta)法^[15].

式(7)可以看出绕射辐射波浪力基本考虑为线性小幅波浪作用情况, 浮体水动力基本考虑为平均湿表面下的压力积分获得, 是基于线性化的水动力进行简化的风浪流与浮式风力机系统完全耦合作用的动态分析方程, 该方法计算快捷, 适合工程应用. 对于恶劣海况下浮基大幅运动时, 非线性的水动力包括: 入射、辐射、绕射波浪力以及回复力, 可以进一步考虑采用瞬时湿表面下的压力积分获得.

浮式风力机系统在小幅振荡中, 风力机也可以认为是平均位置的小幅振荡, 其对整个系统的作用力可以进行近似计算并加适当的修正来解决. 海上浮式风力机系统在恶劣海况下大幅运动, 浮基塔架随之发生运动, 风力机旋转风轮发生运动使得遭遇的风速和风向相对改变, 风力机对整个系统的作用力随之发生较大改变. 在这种工况下需要得到每个时间步上准确的风力机对系统的作用力时历, 才能更进一步地做到浮式风力机系统与风浪流完全耦合计算模拟. 由于塔架高耸、风轮叶片细长, 结构弹性响应也必须考虑. 浮式风力机系统与风浪流完全耦合的时域模拟是当前研究的重点. 近年来 Withee^[16], Lee 等^[17], Wayman 等^[18-19]分别针对 TLP 型和 Spar 型浮基开发了相关的频域、时域耦合计算程序, 美国国家可再生能源实验室针对浮式风力机系统甚至进行了更为完全耦合的空气动力学-水动力学-控制系统-结构分析和模拟. 充分考虑作业背景的环境流场和风力机尺度特征, 针对不同的流动特征综合各种理论方法和计算手段, 更为准确地进行空气动力学-水动力学-控制系统-结构耦合分析是研究的难点和发展方向.

4 结 语

海上浮式风力机系统是海上风电场建设的重要装备, 是有效地开发海上绿色能源的重要工具, 海上浮式风力机系统的设计研发是海上能源开发研究的难题和热点. 论文针对海上浮式风力机的不同形式和特点, 结合海洋工程水动力学研究进展和认识, 在分析海上浮式风力机系统作业所受到风载荷、流载荷、波浪载荷的计算以及系泊动力分析问题的基础上, 讨论了不同工况下的浮式风力机系统与风浪流时域耦合计算分析关键技术及其可能的发展, 充分考虑作业背景的环境流场和风力机尺度特征. 针对不同的流动特征综合各种理论方法和计算手段, 更为准确地进行空气动力学-水动力学-控制系统-结构耦合分析是研究的难点和发展方向.

参考文献(References):

- [1] 缪国平, 朱仁传, 程建生, 王景全. 海上风电场建设与海洋工程装备研发中若干水动力学关键技术问题[J]. 上海造船, 2009, 77(1): 19-25. (MIAO Guo-ping, ZHU Ren-chuan, CHENG Jian-

- sheng, WANG Jing-quan. Some hydrodynamic problems of offshore wind power plants[J]. *Journal Shanghai Shipbuilding*, 2009, 77(1): 19-25. (in Chinese)
- [2] Jonkman J, Butterfield S. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Technical Report. NREL/TP-200-38060. Feb, 2009.
- [3] Tong K. Technical and economical aspects of a floating offshore windfarm[C]//*Proceedings of the OWEMES Seminar*. Rome, Feb, 1994.
- [4] Delpeche K. Hydrodynamic and experimental analysis on a novel hybrid offshore renewable structure[C]//*28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Hawaii, 2009.
- [5] Roddier D, Cermelli C, Weinstein A. WindFloat: a floating foundation for offshore wind turbines[C]//*28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Hawaii, 2009.
- [6] 阮胜福. 海上风电浮式基础动力响应研究[D]. 硕士学位论文. 天津大学, 2010. (RUAN Shen-fu. Study on the dynamic response for floating foundation of offshore wind turbine[D]. Master Thesis. Tianjing University, 2010. (in Chinese))
- [7] JB/T10300-2001. 风力发电机组设计要求[S].北京: 中国机械工业联合会, 2001: 4-11. (JB/T10300-2001. Wind turbine design requirements[S]. Beijing: China Machinery Industry Federation, 2001: 4-11. (in Chinese))
- [8] 风力发电机组规范[S]. 北京: 中国船级社, 2008: 3-10. (Wind turbine specification[S]. Beijing: China Classification Society, 2008: 3-10. (in Chinese))
- [9] YE Xiao-rong, SHENG Qi-hu, ZHANG Liang. A three dimensional numerical method to study aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine[C]//*20th International Society of Offshore and Polar Engineers*. Beijing, China, 2010: 735-740.
- [10] Knauer A, Hanson T D, Skaare B. Offshore wind turbine loads in deep-water environment [C]//*EWEC 2006*. Athens, 2006.
- [11] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1986. (LIU Ying-zhong, MIAO Guo-ping. *Ship Motion in Waves*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1986. (in Chinese))
- [12] Chen X H. Studies on dynamic interaction between deep-water floating structures and their mooring/tendon systems[D]. PhD Thesis. Texas: A & M University, 2002.
- [13] 袁梦, 范菊, 缪国平, 朱仁传. 非线性弹性系泊缆系泊性能研究[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(6): 49-56. (YUAN Meng, FAN Ju, MIAO Guo-ping, ZHU Ren-chuan. Mooring performance of nonlinear elastic mooring lines[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(6): 49-56. (in Chinese))
- [14] 唐耀. Spar 型浮式风机平台动力响应分析[D]. 硕士学位论文. 上海交通大学, 2013. (TANG Yao. Dynamic response analysis of a spar type floating wind turbine platform[D]. Master Thesis. Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese))
- [15] 袁梦. 深海浮式结构物系泊系统的非线性时域分析[D]. 博士学位论文. 上海交通大学, 2011. (YUAN Meng. Time domain nonlinear analysis of the mooring system of deep-water floating structures[D]. PhD Thesis. Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese))
- [16] Withee J E. Fully coupled dynamic analysis of a floating wind turbine system[D]. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [17] Lee K H, Sclavounos P, Wayman E. Floating wind turbines[C]//*20th Workshop on Water*

Waves and Floating Bodies. Spitsbergen, Norway, Jun, 2005.

- [18] Wayman E. Coupled dynamics and economic analysis of floating wind turbine systems[D]. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [19] Wayman E, Sclavounos P. Coupled dynamic modeling of floating wind turbine systems[C]// *Offshore Technology Conference*. Texas, USA, 2006.

Offshore Floating Wind Turbines and Related Dynamic Problems

ZHU Ren-chuan, MIAO Guo-ping, FAN Ju, LIU Hua
(*School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P.R.China*)

Abstract: As one kind of green energy, ocean wind power is plentiful in deep sea, and more and more offshore wind power plants are being on to be constructed in the sea water of depths over one hundred meters. While the offshore floating wind turbine system was working, the wind turbine, floating foundation and mooring system will affect each other through coupling with wind, wave and current actions. The various offshore floating wind turbine systems and the corresponding environmental loads were briefly discussed. It was be a difficult key problem for the future to conduct comprehensive analysis of aerodynamic-hydrodynamic-service system-structure for the coupling effects of the offshore floating wind turbine system and make full consideration of environmental flow field and dimension characteristics of the system structure, there for exploration and sythesis of suitable theories and approaches should be done in advance.

Key words: ocean wind power; offshore floating wind turbine; coupling; dynamics

Foundation item: The National Basic Research Program of China (973 Program)
(2014CB046200)