



海上风电工程结构与地基的关键力学问题

周济福^{①*}, 林毅峰^②

① 中国科学院力学研究所, 北京 100190;

② 上海勘测设计研究院, 上海 200434

*联系人, E-mail: zhoujf@imech.ac.cn

收稿日期: 2013-07-05; 接受日期: 2013-10-28

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11232012, 11172307)

摘要 作为一种新型清洁能源, 海上风力发电受到人们的广泛关注, 近十年发展迅猛. 海上风电结构既不同于陆上风电结构, 也区别于传统的海洋平台, 既要考虑风对风机、塔架的作用, 也要考虑波、浪、流、冰对水下支撑结构和地基的作用, 还要考虑高倾覆力矩作用下地基的变形和承载力. 然而, 与之相关的水动力学、土力学、结构动力学及流-固-土耦合力学等的现有理论, 还远不能满足工程设计和建设的需求, 亟待发展. 本文在阐述海上风电工程发展现状、结构形式与特征的基础上, 重点阐述有关海上风电结构(包括固定式和浮式)的耦合水动力载荷与响应、地基的动力响应与承载特性的研究发展趋势, 从水动力学、土力学和结构动力学的角度, 凝练其中亟待开展深入研究的关键科学问题, 包括: 近海复杂海洋环境条件、海上风机系统的耦合水动力载荷、支撑结构和地基的动力响应等, 并据此提出近期研究的发展方向, 为从事海上风电工程研究和建设的科技人员提供参考.

关键词 海上风电, 极端海洋环境, 水动力载荷, 流固土耦合

PACS: 92.05.Jn, 89.30.Ee, 47.35.Lf, 47.35.Bb, 47.35.Jk

doi: 10.1360/132013-335

1 引言

当今世界能源消耗量不断上升, 且以煤炭、石油、天然气等化石能源为主. 未来几十年内, 世界能源消耗还将持续增长. 然而, 由于化石能源可开发量日益减少, 能源需求的缺口越来越大. 并且, 化石能源的生产和消费对环境造成极大的破坏, 甚至影响

到全球气候的变化. 因此, 当前全球经济发展与能源需求的矛盾日益突出, 能源危机已成为人们的共识.

为应对全球气候变化, 我国提出了“到2020年非化石能源占一次能源需求15%左右和单位GDP二氧化碳排放比2005年降低40%–45%”的目标, 目前正在加快推进包括水电、核电等非化石能源的发展, 并积极有序做好风电、太阳能、生物质能等可再生能源的

引用格式: 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

Zhou J F, Lin Y F. Essential mechanics issues of offshore wind power systems (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1589–1601, doi: 10.1360/132013-335

转化利用。然而, 2011年3月日本福岛核电站事故给全球核能发展带来了极大的冲击, 各国对核能的发展采取了非常谨慎的态度, 中国甚至一度停止了核电的审批作业^[1]。

事实上, 发展可再生的环境友好型能源是解决“能源危机”、缓解“气候变化”、保持社会可持续发展的关键举措^[2]。风电是目前最具规模化发展前景的可再生能源, 世界各国发展风能开发技术呈现争先恐后之势。1973年石油危机后, 美国开始研发风能资源, 这是风能发展史上的重要里程碑^[3]。与此同时, 欧洲的风能业稳步发展, 经过1990年后的20年, 欧洲已俨然成为全球风能业的引领者^[4]。

由于土地资源有限, 大规模的陆地风电场越来越面临选址困难的问题。而海上风能资源优于陆地, 海上风的品质更加优越, 因为海面粗糙度小, 风速大, 离岸10 km的海上风速通常比沿岸陆地高约25%; 海上风湍流强度小, 具有稳定的主导风向, 有利于减轻风机疲劳; 且海上风能开发不涉及土地征用、噪声扰民等问题; 另外, 海上风场往往离负荷中心近、电网容纳能力强。因而大规模发展海上风电越来越受到高度重视, 近十年来发展迅猛, 欧洲尤其是丹麦和英国引领着全球风电的发展。

海上风电的发展历程也就是20年的时间, 现有海上风电工程的基础理论还很不完善^[5], 其发展与实际工程建设极不匹配, 切实针对海上风电工程所面临的复杂水动力环境条件、支撑结构几何与运动特征、地基基础的承载能力及其与上部结构的耦合作用等研究工作亟待深入开展。

2 海上风电发展现状

2.1 海上风能资源

海上风能资源储量相当丰富, 以我国海域的统计数据为例, 联合国环境计划署与美国可再生能源实验室的一份联合研究报告指出, 中国海上风能资源为600 GW^[6]。中国气象局21世纪初的统计数据表明, 我国水深小于20 m海域的风能储量达750 GW, 是陆上风能资源的3倍左右^[6]。2009年底国家气象局发布消息称, 我国沿海水深5–25 m海域的3类风能(平均风能密度大于300 W/m²)储量达200 GW^[7]。根据中国国家海洋局最新调整的数据, 我国海上风电可开发容量为400–500 GW^[8]。

2.2 海上风电开发现状

欧洲是全球海上风电发展的先驱, 1990年在瑞典的Nogersund安装了世界第一台海上风力发电机组, 1991年丹麦建成了世界上第一个海上风电场Vindeby, 但装机只有4.95 MW。此后, 丹麦、瑞典、荷兰和英国相继建设了一批研发性的海上风电项目。2002年总装机160 MW的Horns Rev海上风电场在北海建成, 这是全球首个真正意义的大型海上风电场, 此前最大的海上风电项目规模仅为40 MW^[6]。从1991年至2009年, 欧洲建成并投入运营的海上风电场共38个, 装机容量达到2.056 GW, 其中一半以上的海上风电场是后5年建成的^[9]。截止2010年底, 全球海上风电累计装机容量3.554 GW, 其中2010年当年新增装机容量1.444 GW^[8]。2012年9月的统计数据表明^[10]: 最大的在建海上风电场为英国的London Array, 其装机容量为603 MW; 在运行的海上风电场中, 装机容量排在前四位的均在英国, 均在300 MW以上, 最大者为Greater Gabbard, 装机504 MW; 年发电量最大的海上风电场为丹麦的Horns Rev二期, 2011年发电9.11亿度; 按运行以来的累积发电量计, 排在前三位的均建在丹麦, Horns Rev一期居首, 已累积发电超过52亿度。

近几年, 我国加快了海上风能的发展步伐, 陆续建成了几个海上风电试验样机。特别是, 2010年7月我国建成了第一个海上风电场——上海东海大桥100 MW海上风电示范项目, 这也是全球除欧洲以外的第一个海上风电场。此外, 2010年12月30日, 在江苏响水沿海滩涂建设的201 MW风电场134台1.5 MW机组全部实现并网发电, 2012年11月23日, 龙源江苏如东150 MW海上(潮间带)示范风电场全部投产发电。目前, 一批海上风电场正在建设中(如表1)。

2.3 海上风电发展趋势

从全球海上风电工程建设和科学研究的情况来看, 海上风电逐步在从近岸浅水海域向远岸深水海域(水深大于50 m)发展, 与此相应, 单机装机容量逐渐增大, 风机的支撑结构由固定式向漂浮式发展。

目前, 海上风机绝大部分都安装在30 m以下的浅海, 采用固定式支撑结构, 水深最大的固定式风机安装在英国Beatrice风场, 水深45 m。一般而言, 离岸越远, 风速越大, 风况越稳定, 因而海上风电向远海发展是很自然的, 但固定式支撑结构的成本越来越

表1 中国海上风电建设现状

Table 1 Current status of offshore wind farm construction in China

名称	容量 (MW)	建设状态	说明
东海大桥海上风电示范项目	102	2010.07 建成	34 台 3.0 MW
江苏响水沿海滩涂风电项目	201	2010.12 建成	134 台 1.5 MW 21 台 2.3 MW
江苏如东潮间带示范项目	150	2012.11 建成	20 台 2.5 MW 17 台 3 MW
中海油绥东海上风电试验项目	1.5	2007 年建成	利用已有石油钻井平台做基础
东海风电大容量海上试验样机	8.6	2011.09 建成	1 台 3.6 MW 和 1 台 5.0 MW
中闽-湘电风能 5 MW 海上试验样机	5.0	2012.03 建成	1 台 5.0 MW
东海大桥海上风电二期项目	102	2013 年开工	单机容量 3.6 MW
江苏第一批海上风电特许权项目	1000	2013 年开工	单机容量 3.0 MW
华能江苏大丰海上风电示范项目	300	2013 年开工	单机容量 3.0 MW
上海临港海上风电一期示范项目	102	2013 年开工	单机容量 6.0 MW

高。于是,人们提出了漂浮式风机的概念,认为当水深超过 50 m 时,宜采用浮式支撑结构。事实上,早在 20 世纪 70 年代,麻省理工就提出了大功率漂浮式海上风机的概念,90 年代,美国和斯堪的纳维亚半岛国家的研究机构开始关注漂浮式海上风机概念。2000 年后,欧洲开始了漂浮式海上风机原型机的设计。2008 年,日本三菱重工表示,将开发用于深海的浮式基座和相应的风机设备^[11]。2008 年,荷兰 Blue H 公司在意大利海岸东南离岸 17 km、水深 108 m 处安装了第一台漂浮式海上风机,但装机仅 80 kW。2009 年,该公司又将另一台商业化运作的 2.4 MW 原型机投入运用。2009 年 6 月,第一台大型漂浮式海上风机原型机 Hywind(2.3 MW)由 Statoil Hydro 公司和西门子公司共同设计,安装在挪威的峡湾,离最近的陆地 90 km,风机由海面下一根 100 m 长的浮桶支撑,浮筒由三根固定于海底的缆绳约束。近年来,人们提出了很多浮式风机支撑结构的概念,并开展研究。但目前除少数样机外,还没有大型浮式风电场的建设计划。

随着海上风电的发展,单机容量逐渐增大。1991 年建成的首座海上风电场 Vindeby 的单机装机容量只有 450 kW。此后,兆瓦级风机迅速投入运用,目前已建和在建的海上风机以 3.6 MW 居多。近年来,5 MW 以上大容量风机的研究和应用越来越受到重视,Jonkman & Matha^[12]和 Robertson & Jonkman^[13]分别研究并比较了不同形式的深水 5 MW 风机系统的动力响应,挪威科技大学甚至已经开始研究 10 MW 海上风机叶片的结构设计和气动性能^[14]。我国在东海

大桥海上风电场已建成一台 5 MW 样机,在建的上海临港海上风电示范项目采用 6 MW 风机。

3 海上风电的结构特征

海上风电系统由风机、支撑结构、地基基础三部分组成,如图 1 所示。风机由叶片、轮毂、机舱构成,支撑结构包括:塔筒和下部结构,下部结构分为固定式和漂浮式两种形式。

固定式结构包括:重力式、单桩、高桩承台、三脚架、导管架、吸力桶等(如图 2 所示),其中重力式、单桩和高桩承台结构一般适用于水深小于 30 m 的海域,三脚架和导管架结构可用于 50 m 水深以下的海域。除水深外,地质条件也是选择支撑结构形式需要考虑的重要因素。各种固定式支撑结构的适用条件、优缺点见表 2。2011 年 9 月 GL Garrad Hassan 咨询公司的统计表明(表 2),当时已建和在建的海上风机支撑结构绝大部分采用单桩形式,其他形式也有采用。高桩承台结构在中国东海大桥示范风电场首次使用,上海临港风电场也采用了这种结构。

当水深大于 50 m 时,宜采用浮式结构,如: TLP 或 TLB(Tension Leg Buoy)、Spar-buoy、半潜式、Pontoon 或 Barge 等形式^[12,16]。此外,日本学者曾提出移动式海上风电场(Sailing-type Wind Farm)的概念,即在大型浮式结构上安装若干台风机,如图 3 所示^[17]。目前为止,除少数几台示范样机外,浮式风机还未实现规模化建设,浮式支撑结构还处在概念研究阶段。

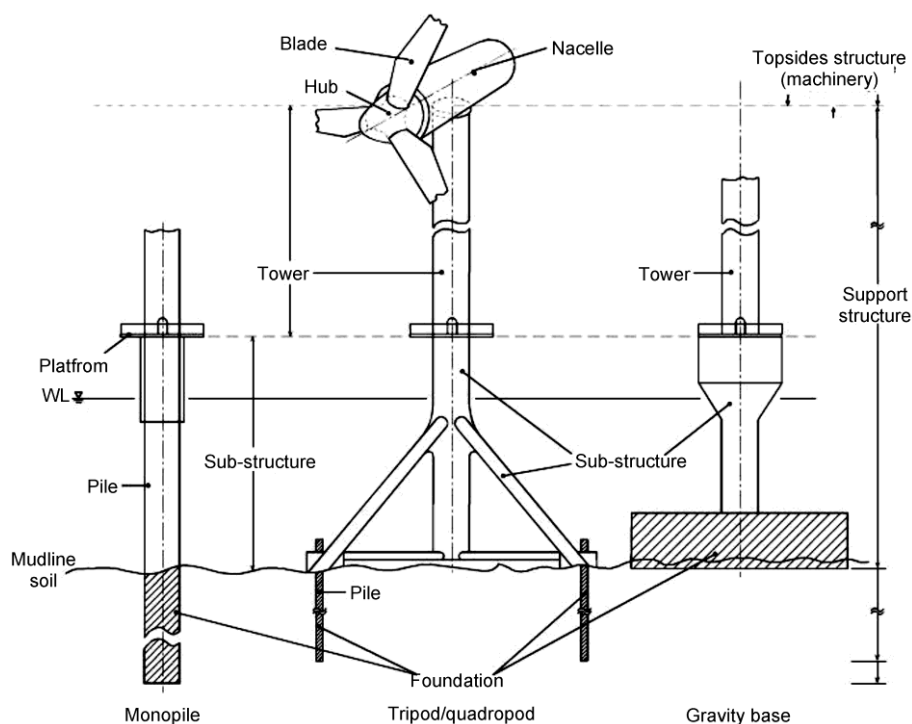


图 1 海上风电系统结构示意图(IEC61400-3)

Figure 1 Main parts of an offshore wind turbine (from IEC61400-3).



图 2 (网络版彩图)典型固定式支撑结构(参见文献[15]图 5)

Figure 2 (Color online) Typical types of fixed substructures (refer to Figure 5 in [15]).

无论采用固定式、还是漂浮式支撑结构, 海上风电工程与陆地风电和海上油气平台工程都有很大区

别, 在系统结构、环境条件、荷载特征等方面都具有特殊性. 首先, 海上风机与塔架要经受台风的严峻考验, 其下部结构还要受到波浪、海流的作用, 且风、浪、流是相互耦合的, 这是陆地风能工程无需考虑的复杂耦合环境条件; 另外, 海上地基可能出现冲刷、液化、软化等现象, 这是陆地风电工程无需考虑的可能引起基础破坏的现象. 其次, 与油气开发平台等传统海洋结构相比, 海上风机支撑结构具有“高耸”的特征, 塔架长径比大、刚度小, 风的横向作用占主导地位, 在横向风载作用下, 塔架易产生大的振动和变形, 风载对海上风机结构的影响比海洋平台显著得多; 此外, 其下部结构的直径往往较海洋平台的桩柱大, 如单桩桩径一般为 4-7 m, 重力式基础尺度更大, 而海洋油气平台的桩径一般仅 1-2 m, 上海东海大桥海上风机基础承台直径 14 m. 并且, 随着水深和单机容量的增大, 桩柱尺寸还会向更大发展. 再次, 海上风机的高耸结构特征和所处的复杂环境条件决定了其下部结构要受到巨大倾覆力矩的作用, 将对地基的强度和稳定性产生显著影响. 最后, 海上风机支撑结构正向漂浮式发展, 其上部高耸塔架的荷载对浮式支撑结构及其水下系泊系统的影响不可

表2 典型固定式支撑结构优劣对比及采用比例

Table 2 Strong/weak points and adopted percentage of typical types of fixed substructures.

类型	优点	缺点	采用比例(%) GL Garrad Hassan 2011年9月	
			已建	在建
单桩 Monopile	结构简单 安装简单 对较轻风机和浅水域效益高 适合海床条件较好的海域	刚度相对较低 灌浆连接问题	71	83
重力式 Gravity Base	结构简单 安装简单 浅水域效益高 应用经验多、可靠性好	需要进行海床处理 需要防冲刷措施 适合浅水坚硬海床	21	-
导管架 Jacket	刚度大 能适应较大水深 应用经验多、可靠性好	制造成本高 需大型安装设备 结构受力复杂 连接点应力集中、腐蚀	3	4
低三角架 Tripod	刚度相对较大 能适应较大水深	制造成本高 结构受力复杂 安装困难	1	-
高门架 Tri-Pile	安装相对简单 能适应较大水深	制造成本高 结构受力复杂 刚度相对较小	-	13
高桩承台 Pile Cap	对软土地基适应性好 刚度大, 整体性和防撞性能好	水动力复杂	-	-
吸力桩 Suction Pile	安装简单 水深限制小 便于拆除和重复使用	不能用于砂砾层海床	-	-

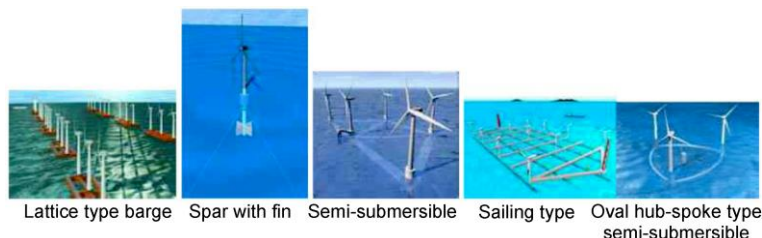


图3 (网络版彩图)移动式海上风电场概念图

Figure 3 (Color online) Concepts of sailing-type wind farms.

忽视, 且浮式基座的平移和旋转以及锚链的运动比海洋油气平台显著得多, 非线性效应强得多. 因此, 切实针对海上风电工程所面临的复杂水动力环境条件和支撑结构几何与运动特征的研究工作亟待深入开展^[18].

4 水动力环境载荷与结构响应

水动力环境与风机支撑结构的相互作用是海上

风电研究与开发的关键力学问题之一, 其中水动力环境、水动力载荷、结构的水动力响应非常重要, 三者依次为后者奠定基础.

4.1 水动力环境

关于水动力环境, 既要考虑常规的风、波、流、冰, 也要考虑台风、甚至畸形波、内波、海啸等特殊的环境条件, 还要考虑它们之间的耦合.

一方面, 几乎所有的固定式海上风电场都处在浅

水区、或中等水深区,即使是浮式结构的风电场,也可能处在中等水深区。在这里,水波的非线性效应不可忽视,常用的线性理论不再适用。例如:中国近海的南汇、东海、大丰、滨海、射阳等风场的设计波浪,均在中等水深区,且接近波浪破碎极限,采用线性水波理论来描述存在困难,需要采用高阶 Stokes 波或流函数理论进行描述,如图 4 所示。Henderson & Zaaier^[19]利用 Blyth 风电场数据研究发现,流函数理论可以很好地描述波峰高度,而线性理论则会导致较大误差。

另一方面,近年来极端海洋环境事件及其所诱发的灾害,如 2005 年重创美国油气工业的飓风、2011 年日本福岛核电站灾难等,已引起工程界和科学界的高度重视,海上风电工程建设必须充分考虑这类极端环境事件的影响。我国近海经常受到频发于西北太平洋的台风的袭击,全球气候变化条件下台风的演化趋势应引起人们的足够重视。Chen^[20]通过对西北太平洋及大西洋地区热带气旋的数据分析,认为热带气旋强度在增加,并与同期海洋表面温度的变化趋势一致。Wang 和 Li^[21]系统分析了 1945-2008 年西北太平洋热带气旋的资料,结果表明在气候变化的背景下,热带气旋活动呈现出非平稳随机过程的特征,即年平均风速值随气温升高而增大、气旋强度有明显增长、台风及强台风年发生频次增加,据此提出了基于非平稳过程的极值风速预报模型,并与基于平稳过程的预报结果进行比较发现,基于非平稳过程的多年一遇风速较平稳过程有所增加(如图 5)。

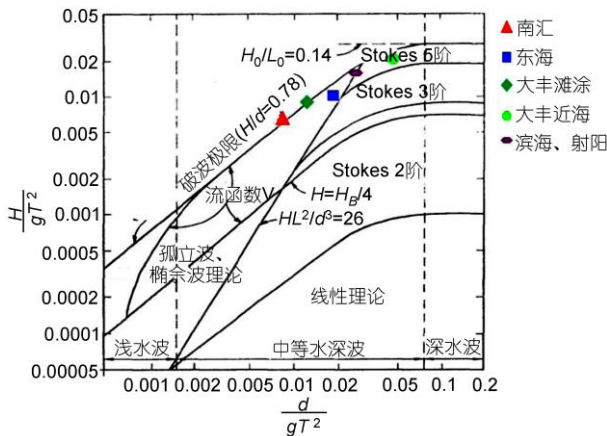


图 4 (网络版彩图)水波理论的适用条件及中国近海风场设计波浪情况

Figure 4 (Color online) Ranges of suitability for various wave theories and designed wave conditions of shallow water wind farms in China.

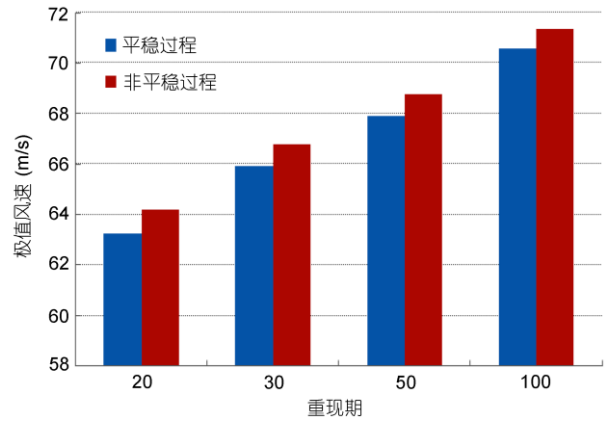


图 5 (网络版彩图)南海不同重现期的极值风速

Figure 5 (Color online) Extreme wind speeds of different return periods in South China Sea corresponding to stationary and non-stationary stochastic process.

台风与海浪的耦合是海上风电工程面临的又一重要的水动力环境问题,因为台风及其伴随海浪的威胁可能是灾难性的^[22]。一般来讲,除涌浪外,特定海域风与浪之间存在密切的联系,风况基本可以决定波浪的运动,而波浪的发展反过来可以通过海面粗糙度的表征来影响风速分布,即风和浪是相互耦合的。Farmakis & Angelides^[23]在考虑风载和波载时,认为“风和波可以来自任何方向”,因而“应考虑风向和波向的一切可能组合”,这显然没有考虑到风和浪的耦合机制。所以,加强台风等极端海洋环境条件下浅海风浪耦合机理与模型的研究,深化对极端环境下海浪生成、发展、耗散及传播演化的认识,对于分析海上风机系统的耦合水动力载荷十分必要。从 20 世纪 60 年代起,以海浪谱传输方程来描述海浪的演化过程成为海浪预报的研究前沿,该模式的预报精度决定于如何合理描述方程的源函数项,包括:风能量输入、波波非线性作用、波浪破碎和海底摩擦引起的能量耗散等。准确确定风能量输入的关键是要合理描述海面风应力,可以通过阻力系数对风应力进行参数化,阻力系数可随风速、海面粗糙度、波龄等因素变化^[24,25], Li 和 Zhang^[26]给出了阻力系数随波龄和风速的双参数依赖关系。波能耗散主要通过波浪破碎、海底摩擦的形式实现,其中波浪破碎所致能量耗散的研究较少,主要有白泡沫模型^[27]和准饱和模型^[28,29]两种理论,Young 和 Babanin^[30]研究发现波向对波浪破碎引起的能量耗散有影响。迄今,海浪谱预报模式经过了三代演变和发展,风能量输入和波能耗散的描述方法也得

到了不断的改进和完善,常用的模式有:WAM, SWAN 和 WAVEWATCH, 全谱空间的第三代海浪数值模式 WAVEWATCHIII 得到广泛应用,但关于波龄和飞沫对风能量输入的影响、波浪传播方向对能量耗散的影响等仍然需要更深入的研究^[31]。

此外,畸形波、内波、海啸等特殊海洋环境条件也是海上风电工程所必须考虑的重要问题,这类特殊海洋环境条件及其对海上风电工程影响的研究工作亟待开展。

4.2 水动力载荷

海上风电支撑结构所受水动力载荷包括波载、冰载和流载。如果我们可以准确描述波动诱导的流场,则波载可以采用流载的计算方法得到。依据结构物是否影响波动流场,可以将其划分为大尺度和小尺度结构分别进行水动力载荷的研究。小尺度结构对波浪场的影响可以忽略,此时可以根据波浪场信息,采用 Morrison 方程较容易地得到结构物的波载。大尺度结构对波浪场的影响不可忽视,一方面,波浪遇大尺度结构会产生绕射,生成绕射波场,另一方面,大尺度结构在波流激励下会产生运动,生成向外辐射的波动场,绕射波场、辐射波场及结构运动相互耦合。一般来说,对小尺度结构,黏性效应起主导作用,而对大尺度结构,绕射效应起主导作用。

对于小波幅情况,可以采用线性波理论进行研究,对简单几何形状的物体已有分析解,如:有限水深中波浪关于直立圆柱或直立圆柱群、截断圆柱绕射的解析解。对复杂几何形状的物体,即使是考虑小波幅的情况,也需要采用数值方法,如有限元法和边界积分法。

然而,海上风电系统主要在浅水区,水波的非线性效应不可忽视,线性水波理论不再适用于风机支撑结构的波流载荷分析^[32]。Henderson 和 Zaaijer^[19]研究表明:采用线性水波模型计算的载荷是偏于不安全的,李家春^[33]指出,在陡波和浅水情况下,非线性效应可以达到线性波载的 20% 以上。遗憾的是,目前求解非线性波的问题仍十分困难,尤其是强非线性波与大尺度结构的相互作用问题,所以必须研究和发展非线性波的绕射理论。20 世纪 80 年代,这方面的研究工作得到了很好发展,形成了谐波叠加法、修正因子法等工程方法,计算破碎波的时间步进法也可以研究有物体存在的情况。对中等波幅的情况,可以应用摄动方法修正线性理论,如二阶绕射理论^[34]。对于任意波幅和

任意形状的结构,目前还只能采用数值方法求解,Liang 等人^[35]采用数值方法研究了非线性波与海上风机支撑结构的相互作用,提出了非线性波与任意截面形状直立结构相互作用的数值模拟方法。

对于固定式支撑结构,尤其是重力式结构和高桩承台结构的承台,其桩柱一般比海洋石油平台的桩柱尺寸大,并且随着水深和单机容量的增大而增大。因此,常用的适用于小尺度结构的 Morison 公式在应用于风机支撑结构水动力载荷计算时受到挑战,因为该公式不能计及绕射效应^[36]。但是由于问题的复杂性,现有的分析软件几乎都仍然采用 Morison 公式^[32]。为了弥补该公式的不足,工程设计中则采用大幅度提高荷载分项系数的方法来保证结构和地基的安全,但由于缺少可靠理论的指导,荷载分项系数的取值具有很大盲目性,往往导致很大的工程浪费^[5]。

对于漂浮式支撑结构,浮体的平移和旋转运动较海洋油气平台显著得多,波的绕射和辐射效应、系泊构件的运动及其与系统整体运动的耦合效应都是不容忽视的^[32],此时需要研究波浪场、水动力载荷、结构运动相互耦合的描述方法。

事实上,在描述结构所受波载时,仅仅区分大尺度结构与小尺度结构是不够的。一方面, Kc 数也是一个非常重要的参数。如前述,一般来说黏性效应主导小尺度结构的受力,但这应该加上大 Kc 数的条件,因为在小 Kc 数时,即使是小尺度结构黏性效应也是不重要的,而是惯性效应起主导作用。另一方面,对于中等尺度的结构,黏性效应和绕射效应同等重要,目前还没有合适的载荷描述方法。因此,需要加强中等 Kc 数下中等尺度结构所受波载的描述方法的研究。

在高纬度海域(例如我国渤海)建设海上风电场,还需要考虑海冰对结构的作用力。海冰载荷与其密度、厚度、温度、压缩和弯曲特性、运动方向和速度等物理力学性质、以及冰与结构的接触方式、结构尺度等有关。目前,关于冰载的计算公式很多,但各家公式的计算结果相差很大,所涉及的系数如何取值具有很大的经验性,尚未取得共识^[37]。此外,冰与结构接触时,裂纹发展直至破碎的过程对冰载计算也有重要影响^[38]。

4.3 水动力响应

在波、流、冰等水动力载荷作用下,风机支撑结构的响应是海上风能研究与开发的另一关键力学问

题,它不仅影响到风机的稳定运行,还对地基产生作用,影响整个系统的安全性。

4.3.1 水面浮体的运动响应

水波的非线性效应将导致水面浮体的平均漂移、低频振荡和高频振荡(包括 Springing 和 Ringing)响应,平台慢漂水平位移往往很大,可造成作业困难、缆索拉断,低频振荡和高频振荡可激励浮体的低频和高频共振。平均漂移力可因水线附近部件时而浸没、时而露出和波浪诱导的平均流动引起,低频振荡可来自不规则波的差频,高频振荡主要来自不规则波的和频。Maruo^[39]基于速度势的远场近似发展了深水浮体平均漂移力的计算方法,Longuet-Higgins^[40]给出了任意水深情况下更一般的平均漂移力表达式。浮体与其缆索之间的相互约束、耦合效应也是高度非线性的,需要开展深入研究,此时附加质量和阻尼系数的研究对于探索浮体的运动响应也十分重要。

20世纪70年代初,人们开始注意到海洋结构的 Springing 和 Ringing 高频振动现象,并针对顺应式平台(尤其是 TLP)开展了大量的研究工作^[41-47],从而逐步认识到, Springing 是和频效应引起的常态响应,而 Ringing 是自由面非线性引起的瞬态响应,两者可造成结构疲劳和平台的突然振动。特别是,针对海上风机结构,Marino 等人^[41]新近提出了一种高效的模型,用于分析随机非线性波的影响,发现:非线性效应对结构响应的贡献是显著的,线性理论会低估波高;陡波会导致结构共振,类似于 Ringing 现象;但如何解释该现象还需要更深入的研究。

近年来,恶劣海况下强非线性波浪及其与海洋结构物的相互作用成为海洋工程界关注的焦点^[48]。人们逐渐认识到仅靠提高设计极限波高是不够的,需要考虑由强非线性导致的波浪翻卷、破碎等瞬态时空特征及其对结构物的作用机理。此时,基于各态历经的平稳随机海浪模型和基于弱非线性水波的摄动理论难以描述这类极端海浪的自然特性,人们对于瞬变恶劣海浪引起的结构物的非线性瞬态响应,以及翻卷、破碎海浪对局部结构的砰击特性等的认识和模拟方法还十分欠缺。

4.3.2 水下构件的动力响应

这里的水下构件主要是指漂浮式支撑结构的缆索或锚链、固定式支撑结构的桩柱等,一般来说,这

些构件的尺度较水波的特征波长小,具有大长径比的结构特征,其水动力响应与水流流速结构、雷诺数、结构质量比(结构质量与其排水量之比)、长径比、刚度等因素有关^[49]。

当波浪或海流经过构件时,漩涡脱落会在构件周围形成不对称的流场和压力场,对构件产生周期性的作用力,引起构件的涡激振动(VIV),这是海洋工程中结构疲劳破坏的主要原因。当涡激振动频率与构件振动的某固有模态频率相一致时,振动将更为强烈,出现“锁频”现象,振幅加剧,可能导致构件破坏。漩涡脱落既可引起构件的横向(垂直于流向)振动(Transverse Oscillation),也可导致流向振动(In-line Oscillation)。

比较而言,人们对横向振动的研究较多,尤其是针对定常流场中的情形。为了描述横向涡激振动,人们相继发展了尾流振子模型、相关模型、统计模型以及多项伽辽金求解模型等。这些数学模型尽管并没有深入细致地研究结构周围的流场,但是它们给出了描述现象的各个参数之间的函数关系,其预测结果和实验结果比较接近,是一种适用于工程的涡激振动响应预测方法。在这些预测模型中,较为流行的是 HC 模型^[50]和 IB 模型^[51],后者是前者的修正。这类模型用非线性振子模型来模拟系统,被统称为尾流振子模型,采用物理变量描述结构和尾迹,并采用一些半经验的流体动力系数,得到两个耦合的微分方程,一个为描述结构的线性振子,另一个为用 van der Pol 振子表达的涡尾流振子。

流向涡激振动进入人们的视野始于 20 世纪 60 年代末,人们于是针对圆柱陆续开展了相关研究。Wootton 等人^[52]通过圆柱实验发现,随着流速的增大,尾涡呈现出对称脱落和交替脱落两种不同的图案,它们引起的涡激振动有很大差别,区分这两种图案的约化速度约为 2。与这两种尾涡图案相对应,流向涡激振动可在两个相邻的约化速度范围内发生共振,最大振幅发生于两个不同的约化速度值。一般认为,当约化速度介于 1 到 3 之间时,便会发生流向涡激振动。最近, Srinil 和 Zanganeh^[53]提出了横向与流向涡激振动的二维耦合模型,可以较好地模拟相关的实验结果。

与定常流情形相比,波浪诱导的涡激振动研究相对薄弱。人们研究静水中的振荡圆柱发现,具有足够柔性的柱体的横向振动频率与涡脱频率相当,而

流向振动频率则为涡脱频率的两倍. Sarpkaya^[34]曾利用振荡U型管,开展一系列实验,详细研究光滑和粗糙圆柱的涡激振动.这方面的相关研究工作主要限于惯性效应为主的情形.

在剪切流的作用下,大长径比构件可呈现多模态参与锁频的特征^[54,55].各阶模态的响应与锁频区域分布有关,当模态锁频区域位于模态的幅值点时,结构对能量的吸收具有最高效率,对应模态的响应幅值也大;当锁频区域位于模态节点时,能量吸收效率为零,对应模态的响应幅值也小.另外,当锁频区域较宽,结构中流体能量传递发生共振的范围就更大,从而结构的响应幅值就较大.

尽管人们针对水下构件的水动力响应开展了不少研究工作,但对于海上风电工程,迫切需要加强具有强非线性特征的柔性结构对复杂水动力条件的响应的研究,需要考虑波流共同作用的情况,甚至需要考虑内波、畸形波、海啸这类特殊水动力环境.

4.3.3 系统耦合响应

事实上,海上风电系统是一个耦合系统,水上风机与塔架、水面浮体、水下锚缆和桩柱、地基等的受力、变形和运动都是不可分割的.对于漂浮式海上风电系统,在波流耦合水动力作用下,水面浮体和水下缆索或锚链的运动,比常规油气开采系统中相应结构的运动大得多,风机和塔架的高倾覆力矩及其运动还要进一步加剧支撑结构的运动.对于固定式海上风电系统,风机和塔架的气动力、水下结构的水动力除了要引起自身运动外,还将对地基产生很大的倾覆力矩.因此,海上风电系统是一个强耦合系统,对该系统结构进行耦合建模,并进行耦合响应分析,是工程稳定性、安全性和经济性论证中的关键问题.

关于风机支撑结构响应的现有研究,大多是分别针对其主要部件展开的^[56,57],包括对叶片转轮、机舱、塔架及基础等关键组成部件的载荷和静/动力特性研究.例如,风机叶片的非定常气动力载荷和基于CFD的流场数值计算^[58,59],叶片旋转时重力和离心力作用产生的叶片气动刚化效应^[60];采用ANSYS等有限元软件对将塔架简化为悬臂梁或圆筒,分析塔架的静变形/应力以及振动频率和模态^[61-63].而从系统耦合的角度开展研究的工作不多,特别是将叶片-机舱-支撑结构(包括塔架和下部结构)-地基作为耦合系统的研究还十分欠缺.仅从水上结构来看,如果不

考虑风机叶片与塔架的耦合,忽略叶片运动对塔顶产生的剪力作用,计算的塔尖最大位移值会明显偏小,当塔体的自振频率与叶片的自振频率相近时,非耦合模型会大大低估塔架的动力反应,使结构设计偏于不安全^[58,64].另外,机舱位于塔架的顶端,有很大的质量和一定的尺寸,它的刚性运动对塔架的动力反应有重要影响.目前为数不多的耦合研究方法^[64,65]中,塔架与叶片的耦合作用是基于剪力传递的,忽略了二者之间弯矩与转矩的传递,且没有考虑机舱的平动和转动以及机舱与塔架的连接刚度对系统运动的影响.

总之,海上风电系统是一个强耦合系统,当前亟需将叶片-机舱-支撑结构(包括塔架和下部结构)-地基作为一个整体,从耦合系统的角度开展深入研究.既要强调风、浪、流等多种环境条件的联合作用及其耦合效应,也要强调结构部件之间的受力、变形和运动的耦合机制.

5 地基响应与承载特性

海上风机支撑结构及地基基础的安全可靠是保证风机长期安全运行的关键条件,也是影响海上风电场投资的重要因素,其成本通常占工程成本的20%~30%,且随着水深的增大而显著增长.

海上风机支撑结构兼有海洋工程、高耸建筑、动力设备基础三大结构特征,这些因素给海上风电工程设计带来一系列难题.作为海洋钢结构工程,其破坏形式和破坏部位较复杂,可能产生的破坏形式有首次超越破坏和累积疲劳损伤,破坏部位可能是支撑结构或地基.最大荷载超过地基极限承载力或者水动力荷载引起的长期应力循环导致海床地基土体强度衰减都会引起地基破坏.另一方面,当海域水深较大时,海床面以上的悬臂结构高度大,在水动力和风荷载作用下,风机支撑结构会产生较大水平变形,给水平变形控制设计带来很大困难.因此,选择合理的计算模型对风机支撑结构和地基进行动、静力分析,准确掌握结构应力和变形状态成为工程设计的重要环节.作为高耸结构,海上风机支撑结构承受巨大的倾覆力矩,且有别于普通高耸建筑结构(作用在基础结构顶部的上部竖向荷载很小),这一受力特点导致风机支撑结构受压侧承受巨大的竖向压力,而受拉侧承受巨大的上拔力,这种受力状态,给承载力设计

和沉降控制设计带来很大困难. 作为动力设备基础, 除了需要满足地基基础的强度和稳定外, 还要确保基础刚度满足整个风机-支撑结构-地基系统的频率响应要求, 以避免系统产生过大振动, 保证风机正常运行. 由于风电机组设备的特殊要求, 包括风机、塔架在内的整个系统所允许的频率范围通常比较狭窄. 与一般的动力设备基础和陆上风机基础不同, 海上风机支撑结构在海床泥面以上有一悬臂段, 其高度依赖于水深. 该悬臂段降低了结构的固有频率, 增大了动力荷载对支撑结构的动力放大效应. 因此, 常规的拟静力分析可能难以确保结构设计的安全, 需要采用合适的动力分析方法进行分析^[66].

海上风电场建设起步于欧洲, 目前绝大多数海上风电场建在欧洲, 因此关于海上风机支撑结构及地基基础的现有研究主要是针对欧洲海上风电的建设条件展开的. 欧洲北海海床以砂土为主, 其物理力学性能较好, 且早期已建风场的单机容量大都小于 3.0 MW, 风机荷载相对较小, 早期风电场水深也不大, 因此欧洲海上风机大部分采用单桩基础, 相关研究也大多针对单桩开展. 单桩结构及其承载机理相对较简单. 随着单机容量和水深的增加, 对风机支撑结构及地基的强度和刚度提出了越来越高的要求, 这促进了人们对新型海上风机支撑结构的研究, 如 2007 年, Beatrice 海上风场首次采用 4 桩导管架安装了第一台 5.0 MW 的海上风机. 中国沿海海床上部地基以软土为主, 且我国规划中的海上风场安装的单机容量基本大于 3.0 MW, 而且未来采用 5 MW 以上更大容量的单机已经成为一种必然的趋势. 因此, 需要研究软土地基上大容量风机的支撑结构型式.

支撑结构附近海床的变形和地基极限承载特性是海上风电系统设计分析面临的重要问题. 在高倾覆力矩和周期性水动力荷载作用下, 海床可能发生液化, 使地基极限承载力骤减, 同时结构周围的土体冲刷运移也会削减地基承载力, 从而威胁海上风机的结构稳定性. 海洋环境荷载引起的海床冲刷与液化涉及流体、结构和土体之间复杂的流-固-土耦合作用. 如何准确预测极限平衡冲刷深度, 是近海结构物附近海床冲刷研究的关键问题之一^[67,68]. 早期研究主要是针对单向流中的墩柱冲刷问题, 从墩柱绕流

和床面泥沙颗粒运移的角度分析冲刷的动力过程^[69]. 然而, 在近海环境下, 波浪循环荷载会引起海床土体内超静孔隙水压的周期性瞬态响应, 有时还伴随孔隙水压的累积响应而使海床发生液化^[70], 波浪循环荷载引起的土体超静孔压响应及液化对于波流共同作用下的桩基附近的海床冲刷存在显著影响^[71]. 因此, 加强高倾覆力矩和周期性水动力作用下海床冲刷与液化的耦合动力学过程及其对地基极限承载力影响机理的研究十分必要.

6 展望

尽管海洋工程已经历了百余年的发展, 但海上风电工程有其特殊性, 且发展历程也较短, 基础数据积累十分有限, 因而, 目前的相关基础理论还远不能满足工程的需求, 相关行业规范还难以有效指导海上风电工程的设计, 海洋工程的传统理论亟待发展和更新, 近期亟需在以下几方面加强研究.

(1) 海上风电系统主要位于浅水或中等水深海域, 必将遭遇复杂的近海海洋环境, 包括台风/飓风及与之相伴随的巨浪、内波、畸形波、海啸等极端海洋环境事件、破碎波等, 这些恶劣环境条件及其相互耦合效应的描述方法与模型亟待研究和发展. 特别是, 在全球气候变化的大环境下, 这类极端海洋环境事件的演化趋势值得关注.

(2) 海上风机及其支撑系统是海洋工程中的一种新型结构, 风、浪、流耦合环境下, 水下结构所受水动力荷载的描述方法与建模理论亟待发展, 包括中等 Kc 数下中等尺度结构的水动力荷载、强非线性波(特别是破碎波、畸形波)荷载、海冰荷载等.

(3) 气、水耦合环境与一体化结构(包括风机、塔架、水下结构、地基)相互作用的耦合建模方法与优化分析理论亟待研究与发展, 包括气动弹性效应、水动弹性效应、风与水上结构的相互作用、波流冰与水下结构的相互作用、流-固-土耦合理论等.

(4) 海上风电工程向深远海、漂浮式、大容量机组发展是必然的趋势, 安全、高效、经济的浮式结构新概念研究势在必行, 探索浮式结构新形式、抑制结构响应的新途径和新技术, 将为我国海洋工程的自主创新提供契机.

致谢 2012年9月21–22日,中国科学院学部主办、李家春院士牵头召开了关于“能源开发利用中的前沿力学问题”的“科学与技术前沿论坛”,我们受邀参加了此次论坛,林毅峰高工报告了本文的内容.本文成文过程中,得到李家春院士的指导,在此深表谢意!

参考文献

- 1 Zhang F. Current situation of energy problem and strategic measures (in Chinese). *Public Commun Sci Technol*, 2013, 2: 49–50 [张芳. 当前能源形势及解决能源问题的对策. *科技传播*, 2013, 2: 49–50]
- 2 Hameed Z, Vatn J, Heggset J. Challenges in the reliability and maintainability data collection for offshore wind turbines. *Ren Energy*, 2011, 36(8): 2154–2165
- 3 Gipe P. Wind energy comes of age California and Denmark. *Energy Policy*, 1991, 19: 756–767
- 4 Kaldellis J K, Zafirakis D. The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Ren Energy*, 2011, 36(7): 1887–1901
- 5 Zaaiker M B. Review of knowledge development for the design of offshore wind energy technology. *Wind Energy*, 2009, 12(5): 411–430
- 6 Zhang D, Zhang X L, He J K, et al. Offshore wind energy development in China: Current status and future perspective. *Ren Sustain Energy Rev*, 2011, 15(9): 4673–4684
- 7 Han J Y, Arthur P J Mol, Lu Y L, et al. Onshore wind power development in China: Challenges behind a successful story. *Energy Policy*, 2009, 37: 2941–2951
- 8 李俊峰等编著. 风光无限 中国风电发展报告 2011. 北京: 中国环境科学出版社, 2011
- 9 Guo Y, Wang Z K. A comparison between European and Chinese Offshore Wind Power Industries (in Chinese). *Sino-Global Energy*, 2011, 16(3): 26–30 [郭越, 王占坤. 中欧海上风电产业发展比较. *中外能源*, 2011, 16(3): 26–30]
- 10 Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_offshore_wind_farms#Other_highly_notable_offshore_wind_farms.
- 11 Luo R Y, Lin Y, Qian Y. The development and prospects of world wind power industry (in Chinese). *Ren Energy Resour*, 2010, 28(2): 14–17 [罗如意, 林晔, 钱野. 世界风电产业发展综述. *可再生能源*, 2010, 28(2): 14–17]
- 12 Jonkman J M, Matha D. Dynamics of offshore floating wind turbines—analysis of three concepts. *Wind Energy*, 2011, 14: 557–569
- 13 Robertson A N, Jonkman J M. Loads analysis of several offshore floating wind turbine concepts. In: the Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii: ISOPE, 2011. 443–450
- 14 Frøyd L, Dahlhaug O G. Rotor design for a 10 MW offshore wind turbine. In: the Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii: ISOPE, 2011. 327–334
- 15 Ryu M S, Kang K S, Lee J S. A suggestion for the foundation type of offshore wind turbine in the test bed on the basis of economic and constructability analysis. In: the Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: ISOPE, 2012. 202–206
- 16 Wang C M, Utsunomiya T, Wee S C, et al. Research on floating wind turbines: A literature survey. *IES J Part A: Civil & Struct Eng*, 2010, 3(4): 267–277
- 17 Manabe H, Uehiro T, Utiyama M, et al. Development of the floating structure for the sailing-type offshore wind farm. In: the Proceedings of OCEANS008 MTS/IEEE Kobe Techno Ocean008. Kobe: IEEE, 2008. 1–4
- 18 Matha D, Schlipf M, Cordle A, et al. Challenges in simulation of aerodynamics, hydrodynamics, and mooring-line dynamics of floating offshore wind turbines. In: the Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii: NREL, 2011. 421–428
- 19 Henderson A R, Zaaiker M B. Hydrodynamic loading on offshore wind turbines. In: the Proceedings of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2004
- 20 Chen G H. Interdecadal variation of tropical cyclone activity in association with summer monsoon, sea surface temperature over the western North Pacific. *Chin Sci Bull*, 2009, 54(8): 1417–1421
- 21 Wang L Z, Li J C. Non-stationary variation of tropical cyclones activities in the Northwest Pacific. *China Ocean Eng*, 2010, 24(4): 725–733
- 22 Li J C. Research progress of extreme environmental events in Offshore Engineering (in Chinese). In: the Proceedings of the Thirteenth Symposium on Offshore Engineering. Nanjing: Chinese Ocean Engineering Society, 2007. 1–6 [李家春. 海洋工程中极端环境事件的研究进展(大会主题报告). 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 南京: 中国海洋工程学会编, 2007. 1–6]
- 23 Farmakis G E, Angelides D C. Fixed bottom tripod type offshore wind turbines under extreme and operating conditions. In: the Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii: NREL, 2011. 291–298
- 24 Deacon E L, Webb E K. Aerodynamic roughness of the sea. *J Geophys Res*, 1962, 67(8): 3167–3172
- 25 Geernaert G L, Laresn S E, Hansen F. Measurements of the wind stress, heat flux, and turbulence intensity during storm conditions over the North Sea. *J Geophys Res*, 1987, 92: 13127–13139
- 26 Li J C, Zhang Z F. Two-parameter-dependent drag coefficient over sea surface by turbulent modeling. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 1999, 4(1): 8–11
- 27 Komen G J, Cavaleri L, Donelan M, et al. *Dynamics and Modeling of Ocean Waves*. New York: Cambridge University Press, 1994

- 28 Philips O M. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. *J Fluid Mech*, 1985, 156(1): 505–531
- 29 Arduhin F, Collard F, Chapron B, et al. Spectral wave dissipation based on observations: A global validation. In: the Proceedings of Chinese-German Joint Symposium on Hydraulics and Ocean Engineering. Darmstadt, 2008. 391–400
- 30 Young I R, Babanin A V. Spectral distribution of energy dissipation of wind-generated waves due to dominant wave breaking. *J Phys Oceanography*, 2006, 36(3): 376–394
- 31 王黎珍. 海洋极端环境及平台安全性研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院力学研究所, 2011
- 32 Muskulus M. Designing the next generation of computational codes for wind-turbine simulations. In: the Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii: ISOPE, 2011. 314–318
- 33 Li J C. Some problems on water wave dynamics research (in Chinese). In: Advances in modern fluid mechanics. Beijing: Science Press, 1991 [李家春. 水波动力学研究的若干问题. 见: 现代流体力学进展. 北京: 科学出版社, 1991]
- 34 Sarpkaya T, Isaacson M. Mechanics of wave forces on offshore structures. Litton Educational Publishing Inc, 1981
- 35 Liang Q H, Zang J, Borthwick A G L, et al. Numerical simulation of non-linear wave interaction with an offshore wind turbine foundation. In: the Proceedings of the Seventh ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Dalian: ISOPE, 2006. 231–236
- 36 Li J C, Wang T. Fluid-structure interaction problems in ocean engineering (in Chinese). *J Nonlinear Dyn Sci Technol*, 1999, 6(4): 286–292 [李家春, 王涛. 海洋工程中的流固耦合问题. 非线性动力学学报, 1999, 6(4): 286–292]
- 37 Lu P, Li Z J. A comparison of ice load on a picket calculated from current criterions (in Chinese). *J Glaciology Geocryology*, 2003, 25(suppl 2): 356–359 [卢鹏, 李志军. 现行规范中计算桩柱冰荷载的比较. 冰川冻土, 2003, 25(增刊 2): 356–359]
- 38 Design of offshore wind turbine structure. Offshore Standard DNV-OS-J101, Det Norske Veritas. 2010
- 39 Maruo H. The drift of a body floating on waves. *J Ship Res*, 1960, 4: 1–10
- 40 Longuet-Higgins M S. The mean forces exerted by waves on floating or submerged bodies with applications to sand bars and wave power machines. *Proc Royal Soci London A-Math Phys Sci*, 1977, 352: 463–480
- 41 Marino E, Lugni C, Borri C. A novel numerical strategy for the simulation of irregular nonlinear waves and their effects on the dynamic response of offshore wind turbines. *Comput Meth Appl Mech Eng*, 2013, 255: 275–288
- 42 Waisman F, Gurley K, Grigoriu M, et al. Non-Gaussian model for ringing phenomena in offshore structures. *J Eng Mech*, 2002, 128(7): 730–741
- 43 Gurley K R, Kareem A. Simulation of ringing in offshore systems under viscous loads. *J Eng Mech*, 1998, 124(5): 582–586
- 44 Chaplin J R, Rainey R C T, Yemm R W. Ringing of a vertical cylinder in waves. *J Fluid Mech*, 1997, 350: 119–147
- 45 Adrezin R, Bar-Avi P, Benaroya H. Dynamic response of compliant offshore structures—Review. *J Aero Eng*, 1996, 9(6): 114–131
- 46 Faltinsen O M, Newman J N, Vinje T. Nonlinear wave loads on a slender vertical cylinder. *J Fluid Mech*, 1995, 289: 179–198
- 47 Natvig B J, Teigen P. Review of hydrodynamic challenges in TLP design. *Int J Offshore Polar Eng*, 1993, 3(4): 241–249
- 48 Rainey R C T. Weak or strong nonlinearity: The vital issue. *J Eng Math*, 2007, 58(1-4): 229–249
- 49 Sanaati B, Kato N. Vortex-induced vibration (VIV) dynamics of a tensioned flexible cylinder subjected to uniform cross-flow. *J Marine Sci Technol*, 2013, 18(2): 247–261
- 50 Hartlen R T, Currie I G. Lift-oscillator model of vortex-induced vibration. *J Eng Mech Division*, 1970, 96(5): 577–591
- 51 Iwan W D, Blevins R D. A model for the vortex-induced oscillation of structures. *J Appl Mech*, 1974, 41: 581–586
- 52 Wootton L R, Warner M H, Cooper D H. Some Aspects of the Oscillations of Full-Scale Piles. Berlin: Springer-Verlag, 1974. 587–601
- 53 Srinil N, Zanganeh H. Modelling of coupled cross-flow/in-line vortex-induced vibrations using double Duffing and van der Pol oscillators. *Ocean Eng*, 2012, 53: 83–97
- 54 Wu X D, Ge F, Hong Y S. A review of recent studies on vortex-induced vibrations of long slender cylinders. *J Fluids Struct*, 2012, 28: 292–308
- 55 Chen W M, Zheng Z Q, Li M. Multi-mode vortex-induced vibration of slender cable experiencing shear flow. *Procedia Eng*, 2010, 4: 145–152
- 56 Takizawa K, Henicke B, Montes D, et al. Numerical-performance studies for the stabilized space-time computation of wind-turbine rotor aerodynamics. *Comput Mech*, 2011, 48(6): 647–657
- 57 Lavassas I, Nikolaidis G, Zervas P, et al. Analysis and design of the prototype of a steel 1 MW wind turbine tower. *Eng Struct*, 2003, 25(8): 1097–1106
- 58 Wang T, Coton F N. Prediction of the unsteady aerodynamic characteristics of horizontal axis wind turbines including three dimensional effects. *J Power Energy*, 2000, 214(5): 385–400
- 59 Tang D, Lu Z L, Wang T G, et al. Wind turbine aerodynamic load and response prediction based on vortex wake method (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2011, 27(3): 140–148 [唐迪, 陆志良, 王同光, 等. 基于涡尾迹方法的风机载荷与响应计算. 空气动力学学报, 2011, 27(3): 140–148]
- 60 Chen X B, Li J, Chen J Y. Analysis of dynamic characteristics of rotating wind turbine blade with centrifugal stiffening effect (in Chinese). *J Earthquake Eng & Eng Vib*, 2009, 29(1): 117–122 [陈小波, 李静, 陈健云. 考虑离心刚化效应的旋转风力机叶片动力特性分析. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 117–122]
- 61 Maneti S, Petrini F. Dynamic analysis of an offshore wind turbine: Wind-wave nonlinear interaction. 2010, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/41096\(366\)184](http://dx.doi.org/10.1061/41096(366)184)

- 62 Bazeos N, Hatzigeorgiou G D, Hondros I D, et al. Static seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower. *Eng Struct*, 2002, 24: 1015–1025
- 63 Ding M H, Li X. Comparative study of different calculation models of offshore wind turbine structure (in Chinese). *Water Resour Power*, 2011, 29(10): 49–52 [丁明华, 李昕. 海上风机结构不同计算模型的比较研究. *水电能源科学*, 2011, 29(10): 49–52]
- 64 Rubak R, Petersen J T. Monopile as part of aeroelastic wind turbine simulation code. In: the Proceedings of Copenhagen Offshore Wind, Conference & Exhibition. 2005
- 65 Murtagh P J, Basu B, Broderick B M. Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading. *Eng Struct*, 2005, 27(8): 1209–1219
- 66 Lin Y F, Li J Y, Shen D, et al. Structure characteristics and design technique keys of wind turbine foundation in Shanghai Donghai-Bridge offshore wind farm (in Chinese). *Shanghai Electric Power*, 2007, 2: 153–157 [林毅峰, 李健英, 沈达, 等. 东海大桥海上风电场风机地基基础特性及设计. *上海电力*, 2007, 2: 153–157]
- 67 Whitehouse R. *Scour at Marine Structures: A Manual for Practical Application*. London: Thomas Telford Press, 1998
- 68 Robert B, Thomsen J H, Forsberg T. Offshore wind turbine foundations-the COWI experience. In: the Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2007–29567. San Diego: American Society of Mechanical Engineers, 2007
- 69 Sumer B M, Whitehouse R J S, Torum A. Scour around coastal structures: A summary of recent research. *Coastal Eng*, 2001, 44(2): 153–190
- 70 Li X J, Gao F P, Yang B, et al. Wave-induced pore pressure responses and soil liquefaction around pile foundation. *Int J Offshore Polar Eng*, 2011, 21(3): 233–239
- 71 Qi W G, Gao F P, Han X T, et al. Local scour and pore-water pressure around a monopile foundation under combined waves and currents. In: the Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: ISOPE, 2012. 159–165

Essential mechanics issues of offshore wind power systems

ZHOU JiFu^{1*} & LIN YiFeng²

¹*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

²*Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China*

Offshore wind energy, as an environmentally friendly and clean energy source, has been drawing more and more attention and seeing its marvelous development in the last decade. The development of technology for offshore wind energy exploitation has so far principally relied on the very extensive base of foundational knowledge used for onshore wind energy, other offshore applications and power management. Nevertheless, this knowledge base is far less complete for offshore wind power engineering design, because complicated environmental loads from extreme winds, waves, currents, ice, etc. and their coupling with structure responses make offshore wind power system very much different in structure from onshore wind turbines and traditional marine oil/gas platforms. It is essentially urgent to deepen understanding of the hydrodynamics and fluid-structure-foundation interactions involved in offshore wind power engineering. The present paper aims to delineate the state of the art of offshore wind power engineering, characteristics of offshore wind turbine system, and, most importantly, to deduce new research trends of some significant topics in areas of hydrodynamics, soil mechanics and structural dynamics, such as extreme ocean environments, coupling hydrodynamic loads, structure responses, and fluid-structure-foundation interactions. It will serve as a good reference to researchers and engineers engaged in offshore wind power engineering.

offshore wind turbine, extreme ocean environment, hydrodynamic load, fluid-structure-foundation interaction

PACS: 92.05.Jn, 89.30.Ee, 47.35.Lf, 47.35.Bb, 47.35.Jk

doi: 10.1360/132013-335