

海上浮式风机载荷计算与动力学分析研究综述

沈意平¹, 张小军¹, 李学军¹, 朱广辉²

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 湘电风能有限公司, 湖南 湘潭 411000)

摘要:海上浮式风机是目前最具开发潜力的新型风电技术,能为蕴藏丰富的深海风能开发提供有效的解决方案.由于浮式基础的大幅度运动、缆索的非线性大变形、叶片和塔架的大柔性及叶片承受的巨大运行风载荷,使得风浪流载荷作用下海上浮式风机系统耦合动力学分析面临着巨大的挑战.考虑到海上浮式风机特有的运动和体型特征,论述了海上浮式风机水动力学、气动力学、锚泊系统动力学和刚柔耦合动力学分析等方面的研究进展,阐明了现有载荷计算和动力学分析方法存在的局限性和可能的解决方法,指出未来应从全局系统出发研究水动力学、气动力学和结构动力学耦合问题,从而发展并形成海上浮式风机的专业分析方法与工具.

关键词:海上浮式风机;大幅度运动;环境载荷;柔性多体动力学

中图分类号:TH113, TK89 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)04-0023-09

State of the art in dynamic modeling and load analysis of offshore floating wind turbines

Shen Yiping¹, Zhang Xiaojun¹, Li Xuejun¹, Zhu Guanghui²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Xiangtan Electric Manufacturing Corporation Ltd., Xiangtan 411000, China)

Abstract: Offshore floating wind turbine is one of the most potential technology that is capable of exploiting the abundant deepwater wind resource. Because of the existing large motion of the floating platform, the nonlinear and large deformation of the mooring line, the large flexible blades and tower, and the big wind loads applied on the blades, there are big challenges to perform dynamic analysis of the integral offshore floating wind turbine under the wind, current and wave loads. By considering the large platform motions and its special profile, the current status of aerodynamics, hydrodynamics, the dynamics of mooring line system and the rigid-flexible multibody dynamic of the offshore floating wind turbine were discussed, and the limitations and the possible solutions about the load analysis and dynamic modeling were presented. For the coupled aerodynamic, hydrodynamic, and structure dynamic behaviors of the offshore floating wind turbine, it was expected to develop specialized analysis methods and tools from the system viewpoint.

Keywords: offshore floating wind turbine; large motion; load analysis; flexible multibody dynamics

海上浮式风机为深海风能开发提供了有效的解决方案,已成为国内外海上风能发电研究的前沿与热点^[1].我国深海域风能蕴藏极其丰富,东海和南海近海平均水深都在 30 m 以上,风能资源约 4.9×10^8 kW,离海岸 30 km 外风能功率密度高达 600 W/m^2 ,居全球首位^[2-3].2010 年以来,美国、挪威和日本等先后提

收稿日期:2014-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205124;11572125);湖南省教育厅优秀青年项目(16B093);湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ4033)

通信作者:沈意平(1981-),女,湖南湘乡人,博士,副教授,主要从事风电技术与装备、机械动力学等方面的研究. E-mail:yiping1011@163.com

出计划建造大型海上浮式风电场.然而,海上浮式风机仍处于概念设计和实验研究阶段,目前全球正在运行的只有挪威 Hywind,葡萄牙 WindFloat 以及日本建造的 2 台样机^[4],挪威预计 2017 年底在苏格兰建成首个商用浮式风电场 Pilot Park.

海上浮式风机是风电和海洋工程结合的产物,这 2 个领域的研究能为浮式风机设计与分析提供理论与经验基础.由于浮式风机独特的运动和体型特征,风浪流载荷作用下的系统耦合动力学分析仍然面临着巨大的挑战^[5].浮式基础的六自由度运动和缆索的非线性动力学特性,使其运动和动力学特性远比陆上和海上固定式风机复杂;浮式基础的大幅度运动、叶片和塔架的大柔性、风力机叶片承受的巨大运行风载荷也使其载荷计算和动力学分析不同于常规的海洋浮式平台.因此,海上浮式风机的设计、分析与控制亟需发展海上浮式风机专业分析方法及工具^[6].

海洋环境的风浪流载荷作用下,柔性风力机、浮式基础、锚泊系统相互耦合运动,系统的动力学特性异常复杂.海上浮式风机的研发还处于起步阶段,系统耦合动力学行为和动态性能评估尚缺乏全面准确的分析方法^[3].欧盟和美国先后启动了 WP4.3^[7], OC3^[8], OC4^[9] 等项目研究海上浮式风机的载荷计算和动力学分析方法. Bladed, FAST, ADAMS, HAWC, HAWC2, WAMIT, BHAWC 和 Flex5 等气动力学载荷、水动力学载荷和结构动力学软件的建模与分析方法,是现有陆上和海上固定式风机分析方法的延伸,不能完全适用于海上浮式风机系统的设计与分析^[4, 8, 10].本文综述了海上浮式风机样机实验、风和波浪载荷计算、锚泊系统非线性动力学以及柔性结构动力学分析等方面的研究进展,阐明了现有载荷计算和动力学分析方法存在的局限性和可能的解决方法.

1 海上浮式风机概念设计与样机实验

海洋工程领域发展了许多类型的浮式基础结构,能为海上浮式风机的开发提供设计经验和依据.国内外研究较多的漂浮式风机概念设计主要有单浮柱式(Spar)、张力腿(TLP)、半潜式和浮筒式基础^[11].单浮柱基础通过压舱物保持稳定,基础悬浮在压舱水线以下,浮体的偏心力矩用来抵消风力机运动中产生的力矩,缆索用于限制运动范围.张力腿基础能够产生比风力机自重更大的浮力,并与缆索张紧力平衡.浮筒式基础通过大面积浮体产生的回复力来确保各种海况下风力机不倾覆.半潜式基础是一种研究最多的组合式结构.图 1 所示为挪威 Hywind、葡萄牙 WindFloat、日本安装的 2 MW 半潜式和单浮柱式样机的现场实景图.



图 1 海上浮式风机样机

现有的海上浮式风机研究大都缺乏实验验证,样机实验的文献报道也较少.2006 年^[12] Hydro Oil and Energy 公司开展 1/47th 5 MW Hywind 样机实验,见图 2a,主要测试了风载荷大于或低于额定风速和 100 年波浪条件下的样机性能.2008 年美国海洋创新和技术研究所和 Principle Power 公司针对 1/67th 的 WindFloat 样机重点测试了风力机基础在波浪中的运动,见图 2b,并与 TimeFloat 软件数值模拟结果进行对比^[13].2012 年,美国 DeepCwind 项目开展了 1/50th 5 MW 单浮柱、张力腿和半潜式样机实验^[4],见图 2c~图 2e,通过实验比较了 3 种样机的动力学响应特点,公开了目前少见的海上浮式风机实验数据,验证并总结了 FAST 软件的仿真分析能力及存在的问题.

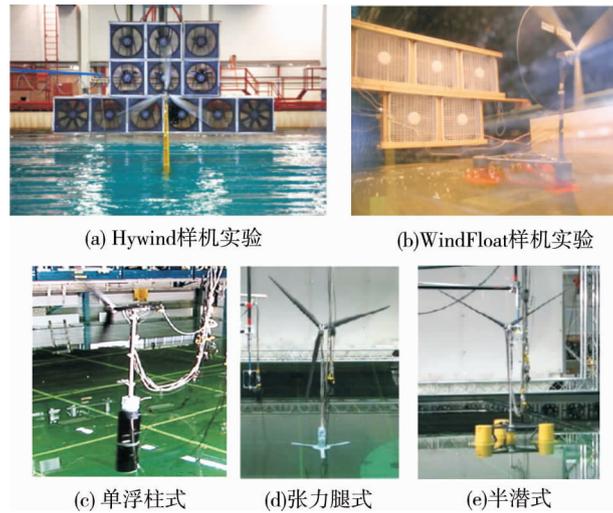


图2 海上浮式风机样机实验

现有海上浮式样机实验中大都采用 Froude 相似准则开展模拟实验,无法满足 Reynolds 相似准则,使得叶片高雷诺数下的气动载荷无法模拟;风浪组合工况的样机实验研究较少,尤其是极限工况的模拟,无法表征实际运行中风力机的运动和动力学响应特征.未来开展风浪联合作用下样机实验时,可以通过增大样机叶片的弦长等措施提高叶片的 Reynolds 数,准确地模拟叶片气动性能及载荷作用;改进风浪载荷模拟方法和风力机响应测试手段,从而使样机实验能够获得更有价值的全面反映物理现象的实验数据.

2 海洋环境载荷分析

准确计算海上浮式风机承受的海洋环境载荷,尤其是极端海洋工况^[14],是海上浮式风机设计及动力学性能评估的关键内容.大尺寸大柔性风力机的重心较高,运行时承受的巨大推力和倾覆力矩使其存在较大的摇荡运动.风力机的气动力学载荷、水动力学载荷以及缆索张紧力等都与其姿态和运动相关,这也不同于常规的海洋浮式平台.这种运动和载荷的相互耦合作用给海上浮式风机动力学性能分析带来了挑战,使得陆上和海上固定式风力机的载荷分析方法不再适应.

2.1 气动力学载荷

从发电量和成本角度考虑,海上浮式风机通常要求设计为 5~20 MW 的大型风力机^[2, 15].大功率的风力机意味着更长的叶片和更高的叶尖速度,叶片气动力学带来的载荷、位移和不稳定性具有重要研究意义.目前,风力机气动力学载荷计算主要基于叶素-动量理论模型(BEM)、广义动态尾迹模型(GDW)和基于计算流体力学的 CFD 方法^[16].

BEM 理论是基于平衡尾流假设的准稳态近似模型,即认为尾流及诱导速度场随叶片承受载荷的变化迅速改变.实际风力机运动在极其不稳定的环境中,桨距角、转速和风速的随机变化,风轮的尾流及其诱导速度场必须经过一段延迟时间才能达到稳定状态,空气动力载荷计算时需要考虑这种“动态入流”效应.叶片上任一点经历的风速通常是不断变化的,从而导致攻角的时变,这将使得翼型升力系数、阻力系数及力矩系数等气动参数异于静态值.这种改变不会在气动载荷中立即表现出来,而是有一个时间延迟.附着流动条件下的时间延迟采用 Theodorsen 理论计算,而边界层分离时,需要采用动态失速理论进行分析.动态失速是指在非定常流场条件下的翼型失速行为,其典型特征是流场分离的延迟.目前气动分析采用的理论往往是近似理论或经验修正模型,如半经验动态失速模型中部分方程来自经验构建,缺乏理论基础.风力机气动性能计算采用的广义动态入流理论(GDW)基于无黏性、不可压缩气体流动的 Laplace 方程的势能流解.与 BEM 理论模型相比,GDW 模型一个显著的优点是允许风轮上更宽的气流压力分布,但在低风速、大气弹偏移和大叶轮锥角等条件下,可能出现较大偏差甚至不稳定现象.CFD 是最为准确的计算方法,但由于其计算量大仅适合分析简单载荷情况.BEM 理论仍是目前气动力学载荷计算的主要方法.

海上浮式风机的大幅度低频运动使得其流场远比陆上和海上固定式风力机复杂,风机叶片具有独特

的翼型轮廓也使得其气动载荷计算不同于常规海上浮式结构.现有气动力学载荷分析结果表明,海上浮式风机存在显著的纵摇运动^[15, 17-18],尤其是采用悬链系泊方式的风机系统.如对于5 MW的NERL baseline风力机的Hywind单浮柱式风机系统,设计载荷作用下的纵摇角度为 8° ,极限设计载荷下将会达到 14° .风力机翼型通常工作在最大升力系数下以获得更大电能输出,风力机的纵摇运动将使得叶片产生更加强烈的动态失速.现有的动态失速模型Beddoes-Leishman是半经验公式,尚未用于浮式风力机的动态失速研究.

除了大角度的纵摇运动,单浮柱式风机系统存在大幅的低频纵荡,这些大幅运动将改变风轮与流场间的作用,影响到浮式风机的气动性能,因此现有的BEM修正模型也不再准确.浮式风机系统首摇刚度通常较低,然而来流风速极易导致产生首摇载荷.BEM理论基于来流风速垂直于风轮平面,仅仅采用考虑倾斜来流的修正模型描述首摇载荷将产生谬误.浮式基础的运动造成叶片与气流相互作用,对叶片翼型的升力系数、阻力系数和扭转系数都具有显著影响.叶小嶸^[19]采用叶素动量理论和Du-Selig动态失速修正求解浮式基础运动下的风力机气动性能;Matha^[5]分析了刚性叶片在给定运动情况下的CFD分析结果.因此,深入研究环境载荷下浮式基础运动对风力机翼型气动性能的影响,对于保证其动态可靠性具有重要的工程意义和理论研究价值.

2.2 水动力学载荷

海上浮式风力机浮式基础和系泊缆索的特征尺寸不同(相比于波长),其水动力学载荷特征与计算方法也不同.对于小直径圆柱结构可以采用Morison公式来计算流体作用力,非圆柱结构通常还需要修正阻力,如半潜式浮式基础.系泊缆索有可能经历海浪诱导的涡激振动而影响风力机系统的稳定性,尤其是单浮柱式风力机.当涡旋脱落频率与结构的固有频率接近时,会在垂直于来流方向上产生强烈的横向振动.结构振动会使涡旋增强、阻力增加,迫使涡旋脱落频率稳定在结构固有频率附近.旋涡脱落带来的载荷非常复杂,目前尚不能很好地预估这种载荷及其响应.

浮式基础结构直径大于0.2倍波长,Morison方程不再适应,必须考虑波浪的绕射和辐射.目前主要采用三维势流理论方法计算,假设浮式基础是静止或微幅运动,其粘性阻尼根据形状特点进行修正.线性水动力载荷通常采用Airy波理论对不同波浪载荷进行计算,现有软件Flex,FAST,Bladed等均可计算.然而线性Airy波理论无法建立浅海常见的陡波和破碎波等非线性波浪砰击载荷模型.海上浮式风机基础和风力机结构的固有频率都远离常见的海洋波频带,但在某些频段上仍表现出较强的非线性运动响应.现有文献和样机实验发现,尽管二阶波浪力数值比一阶波浪力小,但对风力机的纵荡和纵摇有着重要的影响^[20].海浪是含有多种频率成分的随机波浪,不同频率的波浪叠加会产生差频力与合频力,这正是浮式基础低频和高频响应的诱因.由于海上浮式风机水平和垂直方向的回复力很小,二阶波浪力的差频力虽然很小但会使浮式结构产生强烈的共振,造成风力机摇荡和浮式基础运动;合频力则可能引起风力机结构件的共振,导致“弹振”现象发生.波浪与浮式基础的二阶速度势的稳定部分称为平均漂移力,可以将其视静态慢漂力.缆索的张紧力与浮式基础的位移成非线性关系,波浪的平均慢漂力将对缆索张紧力产生重要影响.Kreuzer^[21]采用子结构法研究系泊系统特性,发现二阶波浪力对缆索的运动起主要作用;Mayilvalanan^[22]研究了浮筒式浮式风机的水动力载荷作用下的时域响应分析;Nematbakhsh^[23]定量地研究了张力腿浮式平台海波载荷对风机的振荡运动的影响;Beyer^[24]建立了考虑水动力学载荷的多体动力学和CFD耦合浮式风机分析模型;Robertson^[4]通过样机实验和FAST仿真结果对比,阐明了考虑绕射和辐射的二阶水动力载荷对样机动力学响应的影响,同时提出采用时域信号进行仿真与实验结果对比能够充分掌握风力机的耦合振动特性,从而克服频域方法存在的不足.

目前对于二阶波浪力的性质和产生机理已经有了一些认识,能够对浮式结构的非线性响应作出合理的解释^[11].然而,无论是使用线性还是非线性波浪理论,对于海上风力机波浪载荷的预估都比真实值低.由于浮式基础的大幅度运动,也使得二阶水动力学载荷理论不能完全适应.因此,研究非线性二阶波浪力准确的计算方法,预测二阶波浪力作用下的海上浮式风机系统的非线性动态响应,提出浮式基础减少二阶波浪力载荷和增大结构慢漂阻尼的方法,有利于浮式基础的优化和创新设计.

3 海上浮式风机耦合动力学分析

3.1 叶片和塔架的耦合动力学分析

叶片是展向长、弦向短、柔性大的变截面细长体,塔架也是圆锥形的薄壁圆柱壳形成的变截面细长结构.实际运行过程中,由于风、浪、流载荷的综合作用,叶片和塔架呈现出高阶耦合振动特性.叶片旋转过程中受到离心力、惯性力、科氏力、重力、气动力等联合作用而发生弹性变形,其旋转运动和弹性变形相互耦合,将带来独特的“动力刚化”效应.自从1987年Kane^[25]首次提出“动力刚化”概念以来,研究者们开始关注刚柔耦合动力学机理及数学模型的准确描述.针对风机叶片的动力刚化特性,Li等^[26]从结构力学出发研究了旋转叶片刚柔耦合的离心刚化效应;Santos^[27]研究了转动叶片的简化建模,实验研究了不同转速下叶片的动力刚化及响应特性;Maqueda和Shabana^[28]采用柔性多体动力学的绝对节点坐标法(ANCF)研究离心力对旋转叶片固有频率的影响,指出了旋转叶片产生动力刚化的原因;周传捷、李德源等^[29-30]采用Adams与其余软件联合仿真研究叶片的刚柔耦合特性,Adams软件采用模态坐标法建立柔体的振动方程,其力学实质仍是刚柔零次耦合;陈小波^[31]分析了叶片刚化对风力机塔架风振动响应的影响,表明动力学分析过程中应考虑动力刚化效应的影响;Mutragh^[32]研究了考虑叶片和塔架耦合效应时风力机塔架的风振响应.

叶片和塔架通常采用Timoshenko或Euler梁单元代替,其变截面结构特性也是需要关注的重要特征^[33].叶片翼型轮廓复杂,通常采用分段设计截面尺寸参数;塔架可视为截面形状沿垂向呈现直线变化.现有的变截面梁单元大都基于位移插值的有限元法,将会产生较大误差^[34-35].近年来,基于力平衡的有限元法(FFE)被提出并应用于几何和材料非线性分析.FFE单元严格基于单元截面的力平衡,无需假设单元的位移、应力或应变插值函数,能够克服基于位移的有限元法存在的离散误差,实现快速收敛.De Souza^[36]应用这种方法推导了变截面Timoshenko梁单元;李爽^[37]采用单位载荷法直接推导了Euler-Bernoulli梁的一致质量矩阵;Le Corvec^[38]将这种方法推广到三维空间梁单元,并综合考虑了剪切、扭转及翘曲效应;Su^[39]采用基于应变的几何非线性梁单元来模拟柔性机翼.因此,考虑叶片和塔架的变截面特征,提出准确的变截面梁单元,对于准确建立整机动力学模型具有重要的意义.

现有陆上和海上固定式风机分析软件中通常采用有限元法、多刚体法和模态组合法进行柔性风力机的动力学分析.有限元法能够建立复杂结构的精确分析模型,然而由于海上浮式风机浮式基础的大范围运动、风力机部件间的相对运动使得有限元法不再适应.模态组合法通常采用低阶模态来表征叶片和塔架的柔性振动,该方法不适用于叶片大变形和风力机的漂移和旋转运动.这种模态组合法简化得到的动力学模型,将会导致系统固有频率的谬误和关键动力学响应的丢失.柔性多体动力学方法更加适用于海上浮式风机的动态响应分析.

3.2 锚泊系统非线性动力学分析

海上浮式风机浮式基础在海洋环境载荷作用下的运动响应及系泊缆索张紧力的计算非常重要.锚泊系统通常采用多条缆索,海水水深、缆索长度、尺寸、质量、轴向刚度、悬垂或张紧状态、布置形式及配重块等影响其系泊性能.由于海洋载荷的作用缆索产生几何变形,从而对浮式基础产生横向拖曳力,使锚泊系统具有显著的动力效应.在深水或超深水环境下,系泊缆索的惯性和阻尼会对浮式结构产生很大影响,同时系泊缆索在大变形、大张紧力条件下,缆索变形的非线性效应不能忽略.张力腿基础的缆索初始处于张紧状态,只有当浮式基础产生较大水平偏移时才会产生较大水平回复力,因此其几何非线性较弱.更为复杂的情况是柔性缆索会出现松弛-张紧的交替现象,可能出现很高的动态张紧力而导致系泊系统失效.从目前海洋平台研究可知,当波浪频率较高,或水深超过150 m,或缆索包含锚链时,缆索动力学行为不能忽略.目前对海上浮式风机锚泊系统动力特性机理上的认识还不充分,较多地采用准静态法或力-位移法来包含缆索张紧力作用,不能捕捉缆索的动力学特性和预测缆索张紧力,尤其是缆索涡激振动引起的结构振动.

锚泊系统的动力学分析主要有多刚体法、集中质量法和有限单元法等.多刚体法可以近似地模拟缆索的几何非线性,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节点,节点之间通过弹簧

连接;有限单元法使用有限元模拟挠性缆索的几何构形及张紧力分布,在连续性及求解精度上优势明显.国内外,海洋浮式结构和缆索的非线性静力和动力学分析日益发展成熟,开发了 HARP, MIMOSA, SESAM, AQWA 等软件对海洋浮式结构物及缆索进行动力学分析,广泛研究了浮式结构物在风、浪、流载荷作用下的时间历程和缆索动张紧力变化.与大多数海洋平台不同,海上浮式风机的浮式基础系统承载着巨大的柔性风力机,两者在风和海波载荷联合作用下相互耦合运动. Sweetman^[18, 23, 40]研究了浮式基础平台的刚体运动特性;张社荣^[41]分析了张力腿平台的流固耦合的动力学固有特性; Masciola^[42]研究了缆索动力学对浮式风力机动态响应的影响,其中缆索主要采用力-位移和准静态等方法来简单表征其动力学行为; Matha^[5]应用多刚体法代替准静态缆索模型,缆索和海底间的相互作用采用库仑摩擦单元描述缆索的迟滞特性,这种方法有利于将缆索动力学模型与风力机模型集成建立整机动力学模型.缆索的动力学行为特征直接影响浮式风力机的稳定性及系统响应,不同水深、缆索数量及布置形式下的缆索张紧力及其动力学响应有待深入研究.

3.3 整机耦合动力学分析

目前海上浮式风机系统动力学分析大都是将现有陆上和海上固定式风机分析方法的延伸到海上浮式风机分析,通过软件联合仿真实现风浪流载荷下的系统运动和动力学特性分析. Jonkman^[15]等借助 AeroDyn FAST ADAMS HydroDyn 等软件开展 5 MW 海上浮式风机的耦合动力学仿真分析; Cordle^[43]采用 SIMO/RIFLEX 和多体动力学软件 HAWC2 联合仿真,通过各专业软件仿真分析和数据交互在一定程度上实现了风力机和锚泊系统的耦合分析; Robertson^[17]采用软件联合仿真 DeepCwind 提出的六种海上浮式风机概念设计不同风浪载荷下的分析,并与陆上固定风机性能进行对比以验证浮式基础与风力机的耦合动态特性; Zambrano^[44-45]等采用结构动力学软件 FAST 和 MIT 开发的海波载荷分析软件 WAMIT 开展了风力机和基础平台的耦合运动分析;王磊、何玉林^[46]采用 Admas 建立了 NREL 基本型 5 MW 风机的柔性多体动力学模型,指出水动力学载荷将使平台产生摇荡运动,对整机结构的动力学响应及功率波动有显著影响; Cordle^[47]和 Passon^[48]分析了海上浮式风机现有分析工具存在的局限,并指出采用多体系统建模方法是一种更加适用于风力机-浮式基础-锚泊系统的整机耦合动力学建模方法.上述研究工作建立的力学模型仍然限于局部系统的结构力学,没有全面考虑系统的各种耦合非线性因素,国内相比国外对整机系统动力学的研究更少.海上浮式风机系统完善的动力学建模方法,仍是急需解决的基础问题.

海上浮式风机整机系统形成复杂的刚柔混合多体系统,浮式基础的大幅度运动、缆索的非线性动力学特性、叶片的刚柔耦合效应及其与塔架的高阶耦合振动,使得基于结构力学的动力学建模方法不再适用,柔性多体动力学是建立这类刚柔混合多体系统的有效力学方法.柔体动力学建模方法根据参考坐标系选取的不同,分为浮动坐标系方法、随转坐标坐标系方法、惯性坐标系方法以及这 3 种坐标系的混合坐标系建模.现有方法大都采用低阶模态来表征柔体弹性振动,可归结为基于浮动坐标系的建模方法,其力学实质为零次刚柔耦合. Wasfy^[49]详细对比了柔性多体动力学建模方法的特点和应用;洪嘉振^[50]等针对刚柔耦合建模问题开展了系列理论与实验研究,指出基于不同方法建立的刚柔耦合模型只适用于各自特别的场合; Shabana^[51]综述了浮动坐标法、有限段法、线性弹性动力学、绝对节点坐标法等建模方法,阐明根据应用实际来选择合适的建模方法.

绝对节点坐标方法^[52]是 1996 年由 Shabana 提出,该方法采用斜率矢量代替传统有限元方法中的节点转角坐标,建立的动力学方程具有常数惯量矩阵、不存在科氏力和离心项等特点,并能自动计入动力刚化效应,比传统浮动坐标系方法等更能精确的描述柔性多体系统; Shabana 和 Yakoub^[53-54]首先提出了基于绝对节点坐标法的三维梁单元模型; Garcia-Vallejo 和刘铖等^[55-56]提出采用第一、二类 Piola-Kirchhoff 应力张量及变形梯度张量来计算弹性力以提高计算效率; Gerstmayr^[57]将绝对节点坐标系方法发展应用到柔体小变形情况; Maqueda^[28]将其拓展到转子动力学领域,研究离心力对旋转叶片固有频率的影响; Sugiyama 等^[58-61]采用绝对节点坐标方法研究了大变形绳索系统动力学问题,刘锦阳等^[62]采用绝对节点坐标方法研究三维刚体-柔性梁系统动力学分析;田强^[63]采用该方法研究粘弹性、含间隙运动副、柔性机械臂等多体系统的动力学问题;刘诚等^[64]基于绝对节点坐标方法提出了空间曲梁单元和圆柱壳单元研究大型空间展开结构的动力学问题.因此,发展基于绝对节点坐标方法的梁单元,提出完善的海上浮式

风机整机系统的柔性多体动力分析模型,研究风浪流作用下系统的耦合运动和动力学响应特点,将为海上浮式风机的设计与优化提供分析模型和理论依据。

4 结论

由于海上浮式风机中浮式基础的大幅度运动、缆索的非线性动力学特性、叶片的刚柔耦合效应及其与塔架的高阶耦合振动,海上浮式风机具有独特的气动力学、水动力学和结构动力学特性,需要发展更加准确可靠的载荷计算和动力学建模方法,准确预测风浪流载荷作用下系统的耦合运动和动力学响应。本文总结了海上浮式风机海洋环境载荷计算和动力学建模与分析的研究进展,提出了现有分析方法存在的局限性和可能的技术方案。

海上浮式风电是近期内最具开发潜力的新型风电技术。目前海上浮式风机研制尚处于起步阶段,需要发展风机设计与分析方法,加快浮式风电产业发展。由于海上浮式风机有着不同于陆上和海上固定式风机的载荷和运动特性,也不同于常规的海上浮式结构物和海洋油气平台,因此未来应充分运用多学科理论,深入研究载荷计算和动力学建模方法,从全局出发研究水动力学、气动力学和结构动力学耦合动力学问题。

参考文献:

- [1] Breton S P, Moe G. Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(3): 646-654.
- [2] Musial W, Butterfield S, Boone A. Feasibility of floating platform systems for wind turbines[C]//The 23th ASME Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, USA, 2004.
- [3] 张亮, 吴海涛, 荆丰梅, 等. 海上漂浮式风力机研究进展及发展趋势[J]. *海洋技术*, 2010, 29(4): 122-126.
- [4] Robertson A, Jonkman J, Masciola M, et al. Summary of Conclusions and Recommendations Drawn from the DeepCWind Scaled Floating Offshore Wind System Test Campaign[C]//The ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, France, 2013.
- [5] Matha D, Schlipf M, Cordle A, et al. Challenges in Simulation of Aerodynamics, Hydrodynamics, and Mooring-Line Dynamics of Floating Offshore Wind Turbines[C]//The 21st Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, 2011.
- [6] Butterfield S, Musial W, Jonkman J, et al. Engineering challenges for floating offshore wind turbines[C]//Copenhagen Offshore Wind Conference, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [7] Cordle A, Kaufer D, Vorpahl F, et al. Final report for WP4.3: Enhancement of design methods and standards[R]. Project UpWind, Garrad Hassan and Partners Ltd, 2011.
- [8] Passon P, Kühn M, Butterfield S, et al. OC3—Benchmark Exercise of Aero-Elastic Offshore Wind Turbine Codes[C]//Journal of Physics: Conference Series 75, The Science of Making Torque from Wind, 2007.
- [9] Robertson A, Jonkman J, Musial W, et al. Offshore Code Comparison Collaboration, Continuation: Phase II Results of a Floating Semisubmersible Wind System[C]//EWEA Offshore, Frankfurt, Germany, 2013.
- [10] Coulling A J, Goupee A J, Robertson A N, et al. Validation of a FAST semi-submersible floating wind turbine numerical model with DeepCwind test data[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5(2): 023116.
- [11] 陈恒, 王磊. 深水平台二阶波浪力研究综述[J]. *海洋工程*, 2006, 24(4): 124-128.
- [12] Nielsen F G, Hanson T D, Skaare B. Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines[C]//The 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, 2006.
- [13] Roddier D, Cermelli C, Aubault A, et al. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2010, 2(3): 033104.
- [14] Jensen J J, Olsen A S, Mansour A E. Extreme wave and wind response predictions[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(17): 2244-2253.
- [15] Jonkman J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine[M]. Boulder: University of Colorado, 2007.

- [16] 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.
- [17] Robertson A, Jonkman J. Loads Analysis of Several Offshore Floating Wind Turbine Concepts[C]//The International Society of Offshore and Polar Engineers Conference, Maui, Hawaii, USA, 2011.
- [18] 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[R]. National Renewable Energy Laboratory(NREL), Golden, Co., 2010.
- [19] 叶小嵘, 张亮, 吴海涛, 等. 平台运动对海上浮式风机的气动性能影响研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(3): 123-126.
- [20] Roald L, Jonkman J, Robertson A, et al. The Effect of Second-order Hydrodynamics on Floating Offshore Wind Turbines[J]. Energy Procedia, 2013, 35: 253-264.
- [21] Kreuzer E, Wilke U. Mooring Systems - A Multibody Dynamic Approach[J]. Multibody System Dynamics, 2002, 8(3): 279-296.
- [22] Mayilvahanan A, Selvam R P. Time Domain Response Analysis of Barge Floater Supporting an Offshore Wind Turbine[J]. The International Journal of Ocean and Climate Systems, 2011, 2(4): 303-314.
- [23] Nematbakhsh A, Olinger D, Tryggvason G. A computational simulation of the motion of floating wind turbine platforms[J]. Fluid Structure Interaction VI, 2011, 115: 181-191.
- [24] Beyer F, Arnold M, Cheng P W. Analysis of floating offshore wind turbine hydrodynamics using coupled CFD and multibody methods[C]//The 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, Anchorage, Alaska, USA, 2013.
- [25] Kane T, Ryan R, Banerjee A. Dynamics of a cantilever beam attached to a moving base[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1987, 10(2): 139-151.
- [26] Li J, Chen J, Chen X. Dynamic characteristics analysis of the offshore wind turbine blades[J]. Journal of Marine Science and Application, 2011, 10(1): 82-87.
- [27] Santos I, Saracho C, Smith J, et al. Contribution to experimental validation of linear and non-linear dynamic models for representing rotor-blade parametric coupled vibrations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 271(3): 883-904.
- [28] Maqueda L G, Bauchau O A, Shabana A A. Effect of the centrifugal forces on the finite element eigenvalue solution of a rotating blade: a comparative study[J]. Multibody System Dynamics, 2008, 19(3): 281-302.
- [29] 周传捷, 李德源, 赵世林. 风力机柔性叶片的混合多体模型研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(8): 1011-1017.
- [30] 党长营, 孙文磊, 何连英. 大型风力发电机组柔体叶轮动力学分析[J]. 可再生能源, 2010, 28(6): 18-21.
- [31] 陈小波, 李静, 陈健云. 考虑叶片离心刚化效应的风力机塔架风振反应分析[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 240-245.
- [32] Murtagh P, Basu B, Broderick B. Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading[J]. Engineering Structures, 2005, 27(8): 1209-1219.
- [33] Bir G. Verification of BModes: Rotary Beam and Tower Modal Analysis Code[C]//Proceedings of the 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Orlando, Florida, 2010.
- [34] Spacone E, Ciampi V, Filippou F. Mixed formulation of nonlinear beam finite element[J]. Computers and Structures, 1996, 58(1): 71-83.
- [35] Attarnejad R, Jandaghi Semnani S, Shahba A. Basic displacement functions for free vibration analysis of non-prismatic Timoshenko beams[J]. Finite Elements In Analysis And Design, 2010, 46(10): 916-929.
- [36] De Souza R M, Filippou F C, Pereira A M B, et al. Force formulation of a non-prismatic Timoshenko beam finite element for dynamic analysis of frames[C]//XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Ouro Preto, Brazil, 2003: 789-813.
- [37] 李爽, 谢礼立, 鲍跃全. 直接基于单元平衡的变截面梁反应分析方法[J]. 计算力学学报, 2009, 26(2): 226-231.
- [38] Le Corvec V. Nonlinear 3d frame element with multi axial coupling under consideration of local effects[D]. Berkeley: University of California, 2012.
- [39] Su W, Cesnik C E S. Strain-based geometrically nonlinear beam formulation for modeling very flexible aircraft[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(16): 2349-2360.
- [40] Sweetman B, Wang L. Large-Angle Rigid Body Dynamics of a Floating Offshore Wind Turbine using Euler's Equations of Motion[C]//Proceedings of 2011 NSF Engineering Research and Innovation Conference, Atlanta, Georgia, USA, 2011.
- [41] 张社荣, 黄虎. 海上张力腿平台风电机组结构动力特性研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1198-1203.

- [42] Masciola M, Robertson A, Jonkman J, et al. Assessment of the importance of mooring dynamics on the global response of the deepwind floating semisubmersible offshore wind turbine [C]//The 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, Anchorage, Alaska, USA, 2013.
- [43] Cordle A, Jonkman J M, Hassan G G. State of the Art in Floating Wind Turbine Design Tools [C]//The 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, 2011.
- [44] Zambrano T, MacCready T, Taras Kiceniuk J. Dynamic Modeling of Deepwater Offshore Wind Turbine Structures in Gulf of Mexico Storm Conditions [C]//25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, June 4-9, 2006.
- [45] Wayman E, Sclavounos P, Butterfield S, et al. Coupled dynamic modeling of floating wind turbine systems [C]//The Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2006.
- [46] 王磊, 何玉林, 金鑫, 等. 漂浮式海上风电机组动力学仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1309-1314.
- [47] Cordle A, DATE R. State-of-the-art in design tools for floating offshore wind turbines[R]. Project UpWind, Garrad Hassan and Partners Ltd, 2010.
- [48] Passon P, Kühn M. State-of-the-art and development needs of simulation codes for offshore wind turbines [C]// Copenhagen Offshore Wind Conference, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [49] Wasfy T M, Noor A K. Computational strategies for flexible multibody systems [J]. Applied Mechanics Reviews, 2003, 56(6): 553-613.
- [50] 洪嘉振, 刘铸永. 刚柔耦合动力学的建模方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(11): 1922-1926.
- [51] Shabana A A. Flexible multibody dynamics: review of past and recent developments [J]. Multibody System Dynamics, 1997, 1(2): 189-222.
- [52] Shabana A A. Dynamics of multibody systems [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [53] Shabana A A, Yakoub R Y. Three Dimensional Absolute Nodal Coordinate Formulation for Beam Elements: Theory [J]. Journal of Mechanical Design, 2001, 123(4): 606-613.
- [54] Yakoub R Y, Shabana A A. Three dimensional absolute nodal coordinate formulation for beam elements: implementation and applications [J]. Journal of Mechanical Design, 2001, 123(4): 614-621.
- [55] Garcia-Vallejo D, Mayo J, Escalona J, et al. Efficient evaluation of the elastic forces and the Jacobian in the absolute nodal coordinate formulation [J]. Nonlinear Dynamics, 2004, 35(4): 313-329.
- [56] 刘铖, 田强, 胡海岩. 基于绝对节点坐标的多柔体系统动力学高效计算方法 [J]. 力学学报, 2010, 42(6): 1197-1205.
- [57] Gerstmayr J, Schoberl J. A 3D finite element method for flexible multibody systems [J]. Multibody System Dynamics, 2006, 15(4): 305-320.
- [58] Dmitrochenko O, Yoo W S, Pogorelov D. Helicoseir as shape of a rotating string (I): 2D theory and simulation using ANCF [J]. Multibody System Dynamics, 2006, 15(2): 135-158.
- [59] Dmitrochenko O, Yoo W S, Pogorelov D. Helicoseir as shape of a rotating string (II): 3D theory and simulation using ANCF [J]. Multibody System Dynamics, 2006, 15(2): 181-200.
- [60] Sugiyama H, Mikkola A M, Shabana A A. A non-incremental nonlinear finite element solution for cable problems [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(4): 746-756.
- [61] Gerstmayr J, Shabana A A. Analysis of thin beams and cables using the absolute nodal co-ordinate formulation [J]. Nonlinear Dynamics, 2006, 45(1): 109-130.
- [62] Liu J Y, Lu H. Rigid-flexible coupling dynamics of three-dimensional hub-beams system [J]. Multibody System Dynamics, 2007, 18(4): 487-510.
- [63] 田强. 基于绝对节点坐标方法的柔性多体系统动力学研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [64] Liu C, Tian Q, Hu H. New spatial curved beam and cylindrical shell elements of gradient-deficient Absolute Nodal Coordinate Formulation [J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 70(3): 1903-1918.