

浮式风力机气动-水动力学弱耦合仿真研究进展



陈建东¹, 彭昌阳¹, 叶炜¹, 彭斌^{2,*}, 李孙伟²

¹中国电建集团贵州工程有限公司, 贵州贵阳 550003

²清华大学深圳国际研究生院, 广东深圳 518055

摘要: 浮式风力机气动-水动力学弱耦合是指通过强制给定叶轮特定运动的方式来代替浮式载体对叶轮的影响, 以此近似地研究浮式风力机的特征气动性能的研究方式。近十年来不少学者通过弱耦合方法研究了风力机在运动状态下的气动载荷以及尾流特性, 为揭示浮式风力机气动性能提供了基础。当考虑载体运动后, 一些传统的风力机气动模型将会失效, 同时运动导致的复杂扰流、尾流情况也为叶轮的气动模型带来了挑战。本文将从弱耦合动力学模型和弱耦合下风力机气动特性研究两方面进行综述。指出今后弱耦合动力学模型需要加强在流动分离、流固耦合方面的解析能力, 弱耦合研究还需要重点关注除纵荡纵摇之外其他自由度下的尾流特性分析。

关键词: 浮式风力机; 弱耦合; 动力学模型; 纵荡; 纵摇

DOI: [10.57237/j.jest.2024.02.002](https://doi.org/10.57237/j.jest.2024.02.002)

A Review on the Aero-Hydro Partially Coupled Dynamics of Floating Offshore Wind Turbine

Jiandong Chen¹, Changyang Peng¹, Wei Ye¹, Bin Peng^{2,*}, Sunwei Li²

¹PowerChina Guizhou Engineering Corporation Limited, Guiyang 550003, R. P. China

²Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, R. P. China

Abstract: The partial coupling of aerodynamics and hydrodynamics in floating wind turbines entails an approach where the study of aerodynamic performance characteristics is approximated by imposing specific motions on the rotor while neglecting the influence of the floating platform. Over the past decade, numerous scholars have utilized partial coupling methods to explore the aerodynamic loads and wake characteristics of moving wind turbines, thus establishing a foundational understanding of the aerodynamic performance of floating wind turbines. When accounting for platform motion, traditional aerodynamic models for wind turbines may lose validity, while the intricate flow disturbances and wake conditions induced by motion present challenges to rotor aerodynamic modeling. This paper offers a comprehensive review, delving into two facets: partially coupled dynamic models and the examination of aerodynamic characteristics under partial coupling. It underscores the need for future advancements in analytical capabilities within partially coupled dynamic models, particularly in flow separation and fluid-structure coupling. Additionally, it highlights the necessity of focusing on

基金项目: 本研究来源于“海上风电安装关键技术研究”子课题四“海上风电水下作业技术研究”
(合同编号 GZGC-KJWHT-2023-001-04), 并由本项目提供支持。

*通信作者: 彭斌, pengb23@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2024-03-31; 接受日期: 2024-05-06; 在线出版日期: 2024-05-23

<http://www.energyscitech.org>

the analysis of wake characteristics concerning degrees of freedom beyond heave and pitch motions.

Keywords: Floating Offshore Wind Turbine; Partially Coupled Dynamics; Dynamics Model; Surge; Pitch

1 弱耦合定义

相比于固定式风力机,浮式风力机的基础从与大地刚性连接的固定式基础变为了柔性连接的浮式基础,这为其整机动力学的研究带来了困难。浮式风力机整机动力学问题本身非常复杂,主要表现为在风、浪、流的共同作用下,浮式风力机会产生大幅度、低频率的运动响应,整机始终处于惯性力与外部载荷动态平衡的状态,各组成部分之间相互作用、高度耦合,系统动力学呈现高度的非线性特征[1]。面对这个复杂的问题目前的分析方法也存在困难,即浮式风力机整体动力学的分析方法也面临着挑战。一方面,浮式风力机的水池模型试验存在技术挑战,如无法同时满足雷诺数和弗劳德数相似准则、一般海洋工程波浪水池搭配的开放式风扇矩阵并不具备封闭式风洞制造高质量稳定风的能力等问题。另一方面过去在固定式风力机动力学领域成熟的动力学模型对于浮式风力机已不再适用,如传统叶素动量理论(BEM)用在浮式风力机上的精度会有严重损失[2],基于势涡理论的方法无法精确处理运动过程中风力机的复杂入流状况以及叶片于尾流相互作用问题。因此在过去十数年间,考虑了各部分之间耦合关系的时域分析方法一直都是浮式风力机整体动力学研究领域的重难点[3]。

然而到目前为止,全耦合分析仿真技术仍不够成熟[4]。在此背景下,部分学者采用了折中的办法来对浮式风力机进行动力学分析,其出发点在于通过对全耦合问题进行简化,达到揭示关键部件的特征表现并得出泛化结论的目的。这类方法主要从两个层面对全耦合问题进行简化分析:1) 对部件之间动力学的耦合关系进行简化,将双向的耦合简化为单向,即将其它部件的载荷或运动作为边界条件给定到分析部件的计算当中(而不考虑两者间的相互耦合);2) 在上一步的基础上,将边界条件(载荷或运动)进行简化,例如将叶轮所受到复杂的非定常气动载荷简化为定常载荷或是风速的函数,或将浮体复杂的六自由度运动响应简化为单自由度或少数自由度组合的简谐运动。目前此类研究主要关注叶轮的气动性能以及浮式载体的水动载荷及运动响应,本文主要关注叶轮气动力学的弱耦合研究进展,下面将从动力学模型和弱耦合气动表现两方面展开。

2 弱耦合动力学模型研究现状

关注叶轮气动性能的弱耦合研究通常是通过给定叶轮一个附加运动来代表浮式载体的运动响应对气动载荷的影响。到目前为止,绝大多数此类研究给定的附加运动形式为单自由度简谐运动(此外也有少部分研究给定的是数个自由度的简谐运动耦合或者是单自由度的非简谐运动),运动周期和频率的选取一般基于已有的各类漂浮式风力机平台在常见海况下运动响应的试验测试结果的特征值,其目的在于探明各个自由度对气动载荷以及入流、尾流的影响。到目前为止,采用的动力学模型主要有三种: BEM, 基于涡势理论的方法(包括升力线法、升力面法、自由涡尾迹法、广义动态尾流、涡格子法等),以及计算流体力学(CFD)[5]。在早期,此类研究常采用 BEM 或基于势涡理论的方法来探明运动状态下叶轮的功率以及推力系数。2014 年 De Vaal 等[6]将 BEM 理论与动态入流模型结合用于 NREL5MW 全尺寸风力机在纵荡工况下的气动载荷及尾流分布,发现其载荷数据与 CFD(叶片采用制动力学建模)计算所得结果基本一致,一定程度上验证了此方法的有效性,但需要注意的是,其计算所设纵荡参数的参考依据为张力腿基础在常见海况下的运动表现,由于张力腿基础在流向的约束较强,纵荡速度相对较低,故动态入流以及尾流对载荷的影响相对较低,并不能完全说明此类方法对于浮式风力机纵荡工况下气动载荷计算的适用性。Sebastian 等[7]指出对于浮式风力机 BEM 理论的假设或将不成立从而导致载荷计算精度会有损失,并基于势流理论,将自由涡尾迹法与升力线法结合对浮式风力机的动力学建模并对比验证了其结果的有效性,发现此方法在求解浮式风力机载荷方面相比于 BEM 方法具有一定的优势, Wen 等[8]的研究也证实了这一结论。在 Sant 等[9]通过波浪水池及风洞张力腿式浮式风力机模型试验发现以上两种方法(基于 BEM 法及基于升力线法)会明显高估纵荡工况下的风力机气动载荷波动,证实了 BEM 法对浮式风力机载荷计算的精度有限(且精度随着叶尖速比以及纵荡运动速度的增大而降低)。Jeon 等[10]和 Jing 等[11]发现涡格子法在研究浮式风力机叶片扰流状况方

面具有一定优势。Micallef 等[12]采用三种方法(BEM、广义动态尾流模型、CFD)研究了不同叶尖速比下风力机纵荡时的气动载荷表现以及尾流情况, CFD 计算中叶片采用制动面建模并以其结果作为对照验证了其余两种方法计算结果的准确度, 在叶尖速比较低时(不超过额定叶尖速比) BEM 法与广义动态尾流模型所得载荷均值与 CFD 计算结果吻合得较好, 但 BEM 法所得载荷的波动幅度与 CFD 计算结果相差较大。

BEM 法受限于对于物理现象的简化过多, 应用场景过于理想化, 尽管其经过了大量修正, 但对于运动状态下的风力机气动载荷的预测能力仍有局限。而基于涡势理论的方法相比于 BEM, 虽然能够一定程度上考虑到由运动导致的复杂非定常入流情况, 因而在气动载荷预测精度上有一定优势, 但由于其忽略了粘性效应, 在具有强非线性特征的此类弱耦合现象仿真中仍具有一定的局限性。综上, BEM 以及基于涡势理论的方法可以用于低叶尖速比、缓和平台运动状态下的浮式风力机叶轮整体的载荷以及扰流情况的快速预测, 但近年来高性能计算机以及精细化的流场测量技术的引入使得对此问题的研究更加深入, 此类研究重点工和研究需求由叶轮的整体功率和推力系数转向了精细化的载荷以及尾流特征, 需要用到高精度 CFD 仿真技术。近年来, CFD 方法已经成为了此类弱耦合研究的主流方法, 一般采用 SST k-w 模型来模化所有湍流涡的雷诺平均法 (RANS), 然而风力机在运动过程中必然伴随着严重的流动分离, 而 RANS 对于流动分离的解析精度较差[13], 因此有必要用更高精度的 DES 类或 LES 类湍流模拟。Lei 等[14]指出对于考虑载体运动浮式风力机来说 DES 法由于对流动分离出色的解析能力以及相对 LES 法更高的计算效率, 非常适合于涉及到运动的复杂工况, 通过与 RANS 法对比发现 IDDES 法在风力机气动载荷、流动分离现象的计算精度有着巨大优势。近几年在纵荡[15-17]、纵摇[18]、以及横荡[19]等其他自由度的研究中得到了应用。需要注意的是, 目前浮式风力机弱耦合的尾流研究中数值模拟的验证方法为与固定式试验的载荷及尾流数据对比, 而非以运动工况下的实验数据作为验证依据, 由于缺乏运动状态下的试验流场数据的直接对比, 尽管是 DES 或 LES 也并不能完全保证尾流数据的准确性。建立运动下的叶轮气动模型仍是浮式风力机研究领域的一大挑战, 这也正是 OC6 项目预期目标之一。

以上研究都是将叶片视为刚体, 但现代大型叶片的柔性较大, 叶片变形引起的结构荷载以及绕流情况

的改变不可忽略, 有部分学者研究了考虑简单浮体运动时叶片的结构变形以及应力分布。Bazilevs [20]将一种改进的动网格技术与流固耦合结合实现了浮式风力机的艏摇运动。王子英[21]采用弹性制动线技术分别研究了小幅度纵荡和小角度纵摇运动过程中的载荷及尾涡结构。王利东[22]通过单向流固耦合技术研究了不同纵荡振幅和频率下叶片的形变量以及等效应力, 发现纵荡运动会增大叶片的最大变形量和最大等效应力, 且纵荡振幅的变化对叶片弹性能的影响较大。总的来说, 目前考虑浮体运动的叶片结构应力以及变形的研究还不够全面, 而运动过程中的叶片形变及应力的分布和变化涉及到浮式风力机的结构安全与寿命评估, 也可能影响到尾流分布, 因此还值得进一步的研究。

3 关注叶轮气动力学的弱耦合研究现状

在六个自由度中纵荡和纵摇最受关注, 这是因为导致平台运动的三种载荷(风、浪、流)中风载荷远大于水动载荷(浪、流), 因此整机的六自由度运动中由叶轮气动载荷所引发的沿风向运动(纵荡、纵摇)的幅度要明显大于其他四个自由度[23], 早期(2012-2014 年)数个研究表明纵荡和纵摇对叶轮的气动载荷要明显比其他四个自由度更大[2, 7, 24, 25], 这一结论为后面的弱耦合气动研究提供了指导, 并得到了反复的验证[26]。

纵荡与纵摇对于叶轮气动性能的影响程度和机理整体上基本一致, 首先在纵荡和纵摇工况下叶轮的水动载荷表现出很强非定常性, 叶轮的推力和功率发生于运动同频的周期性波动[27], 波动峰值可达无纵荡/纵摇时的 1.5 倍[28], 这表明纵荡/纵摇会严重地增加叶片的疲劳载荷, 影响机组寿命。Wen 等[8]研究了纵荡运动参数对风力机气动载荷的影响规律以及载荷波动机理, 发现气动载荷的剧烈波动不是源自纵荡速度本身, 而是纵荡导致的叶片攻角的变化, 并将 Sebastian 等[24]提出的用于全耦合工况的降频分析参数用于纵荡工况下荷载分析, 发现纵荡运动的振幅与频率对功率和推力系数的影响是等价的。Lee 等[26]发现流向的运动(纵荡、纵摇)由于会明显改变叶片攻角从而对气动载荷的影响要远大于其他四个自由度。Tran 等[29, 30]发现气动载荷的波动特性对纵摇运动的敏感程度比艏摇运动高 12-16 倍。另一方面运动对于气动载荷的均

值也有影响, Micallef 等[12]发现纵荡运动会明显地提高转轮功率系数均值(纵荡速度极值为风速的十六分之一, 额定叶尖速比下功率系数增加了 10%), Farrugia 等[31]通过水池模型试验证实了纵荡运动在导致气动载荷瞬时值剧烈波动的同时会明显增大其时均值。

其次纵荡和纵摇运动由于给转轮施加了一个流向的速度分量, 当运动幅度较大时会使得叶片反复进出其尾流区, 导致叶片和尾流的强相互作用, 这会严重的影响叶片的入流特性, 从而导致气动性能降低、动态失速、不良运行状态等后果, 此外这种叶片和尾流的相互作用现象无法由 BEM、广义动态入流理论这样的风力机传统气动力学模型所准确建模, 为数值求解

带来了技术挑战。Jeon 等[10]研究了风力机在纵摇工况下叶片扰流情况, 发现在纵摇过程中叶片扰流会不断地在正常状态 (normal working state) 和紊乱状态 (turbulent wake state) 中切换, 极大地增加了尾流的非定常性, 对此过程 Jing 等[11]进行了深入的研究, 发现纵荡过程中还会进入涡环状态 (vortex ring state, 如图 1(d)所示) 并在此阶段载荷瞬时值达到波动峰值。Tran 等[29, 32]观测到叶片在流向来回纵荡/纵摇过程中与尾涡相互作用, 一方面这会影响叶片气动性能并导致疲劳载荷加剧, 另一方面这会极大地增大对于气动载荷预测模型或湍流模型的精度要求。

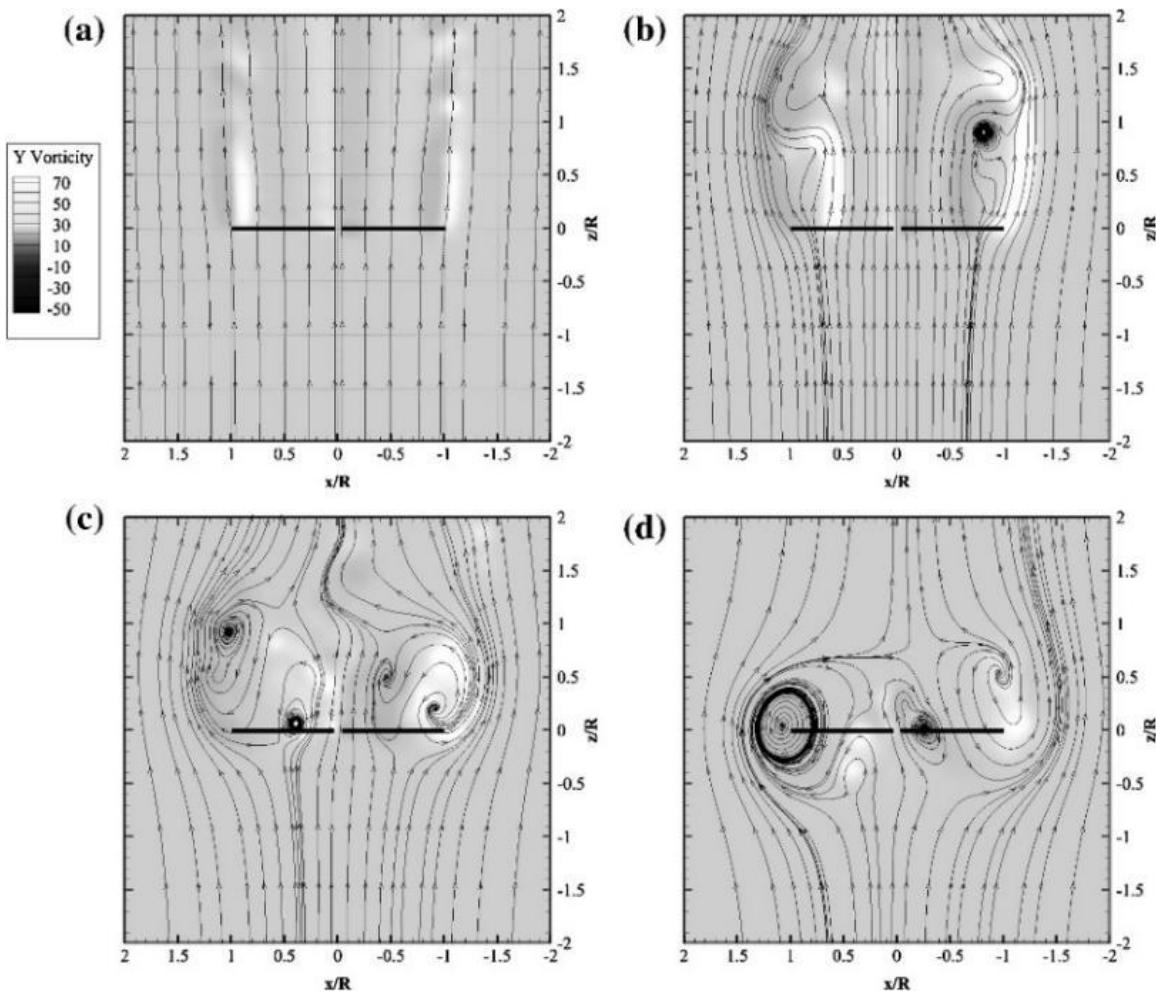


图 1 纵摇过程中叶片扰流状态[10]

最后, 纵荡/纵摇运动使得尾流变得更加复杂, 叶片和尾流的相互作用过程中会与叶尖涡发生碰撞(如图 2 所示), 从而加速了叶尖涡的破碎, 缩短了大尺度转化为小尺度涡的过程, 使近尾流更加紊乱,

削弱了径向的速度梯度, 有利于尾流与环境的动量交换, 最终促进了尾流恢复。但另一方面, 叶轮流向的运动会使得叶尖涡间距间歇性地变化[32], 也在一定程度上也促进了叶尖涡的融合 (Vortex pairing, 如图

3 所示)。

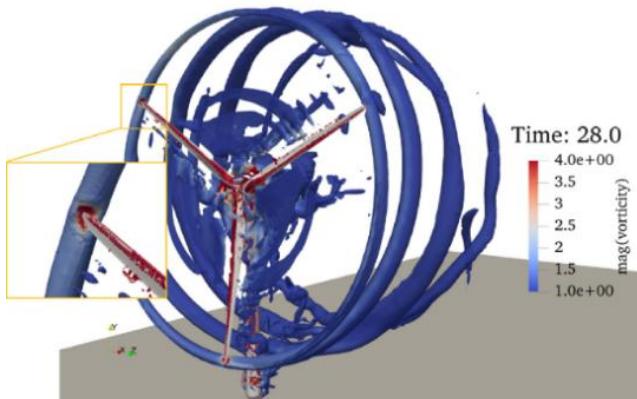


图 2 纵荡过程中叶片与叶尖涡碰撞[33]

在特定的纵荡工况下,叶尖涡甚至会融合成更大尺度的涡环(如图 4 所示),在此情况下尾流的速度恢复可能会变得比无纵荡工况更慢[16]。尽管纵荡和纵摇对载荷的影响要明显大于其他四个自由度,但尾流在所有自由度下都发生了明显的改变(Lee 等[26]发现六个自由度对于尾流的影响程度都很大),任一自由度都会加快叶尖涡的破碎过程从而严重加剧尾流的不稳定性。然而对于纵荡纵摇之外的其他自由度下的尾流研究还远远不够,目前仍是一个待解决的课题。



图 3 纵摇过程中叶尖涡融合[34]



图 4 纵荡过程中叶尖涡融合配对[16]

4 结语

综上,浮式风力机水动-气动力学弱耦合动力学模

型和弱耦合下风力机的载荷、扰流、尾流研究已取得了较大的进展,纵荡和纵摇两个自由度下风力机的载荷、入流、尾流特性已经得到了较为全面的揭示。但动力学模型在解析复杂气动现象方面的动力还有待发展,风力机在所有运动状态下尾流特征还缺乏深入研究。因此,以下方面的工作还需要进一步完善:

- 1) 目前关注叶轮气动力学的水动-气动弱耦合研究一般采用基于 RANS 方程的 CFD 模拟,此方法对于流动分离现象较差的解析能力会导致弱耦合下叶轮气动载荷、扰流、尾流预测的误差,需要采用更高精度的湍流描述方法。此外尽管目前已有一些弱耦合风洞试验,但还没有弱耦合数值模拟与弱耦合试验的直接对比,有必要通过直接对比得出目前主流动力学模型在弱耦合下风力机载荷、尾流的误差的定量数据。
- 2) 目前绝大多数考虑浮体运动的叶轮气动性能弱耦合研究将叶片处理为刚体,而现代大型叶片一般为大尺度的柔性体,其变形不可忽略,尤其是考虑浮体运动后叶片的气弹变形、颤振需要考虑,另一方面叶片的变形会使入流情况更加复杂,因此有必要采用双向流固耦合模型对叶片的结构力学进行建模。
- 3) 从单机组载荷的角度来看,纵荡和纵摇带来的影响远大于其他四个自由度,其影响程度和机制目前已得到了较为全面的揭示。但从风电场布置的角度,所有自由度对风力机尾流的影响程度基本一致,为留在所有自由度下都表现出高度的非定常性,目前对于弱耦合工况下的尾流特征的认识还严重不足,需要更深入的研究。

参考文献

- [1] 胡志强. 浮式风电机动力响应分析关键技术综述 [J]. 船舶与海洋工程, 2020, 36(6): 1-13.
- [2] SEBASTIAN T. The Aerodynamics and Near Wake of an Offshore Floating Horizontal Axis Wind Turbine [D]; University of Massachusetts Amherst, 2012.
- [3] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy [J]. Science, 2019, 366(6464): eaau 2027.
- [4] ASIM T, ISLAM S Z, HEMMATI A, KHALID M S U. A Review of Recent Advancements in Offshore Wind Turbine Technology [J]. Energies, 2022, 15(2).

- [5] 邹晓阳, 潘卫国. 海上浮式风机动力学仿真分析研究进展 [J]. 发电技术, 2022, 43(02): 249-59.
- [6] DE VAAL J B, HANSEN M O L, MOAN T. Effect of wind turbine surge motion on rotor thrust and induced velocity: Effect of wind turbine surge motion on rotor thrust and induced velocity [J]. Wind Energy, 2014, 17(1): 105-21.
- [7] SEBASTIAN T, LACKNER M A. Development of a free vortex wake method code for offshore floating wind turbines [J]. Renewable Energy, 2012, 46: 269-75.
- [8] WEN B, TIAN X, DONG X, et al. Influences of surge motion on the power and thrust characteristics of an offshore floating wind turbine [J]. Energy, 2017, 141: 2054-68.
- [9] SANT T, BONNICI D, FARRUGIA R, MICALLEF D. Measurements and modelling of the power performance of a model floating wind turbine under controlled conditions: The performance of a model floating wind turbine in a wind tunnel [J]. Wind Energy, 2015, 18(5): 811-34.
- [10] JEON M, LEE S, LEE S. Unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines in platform pitching motion using vortex lattice method [J]. Renewable Energy, 2014, 65: 207-12.
- [11] DONG J, VIRÉ A. The aerodynamics of floating offshore wind turbines in different working states during surge motion [J]. Renewable Energy, 2022, 195: 1125-36.
- [12] MICALLEF D, SANT T. Loading effects on floating offshore horizontal axis wind turbines in surge motion [J]. Renewable Energy, 2015, 83: 737-48.
- [13] 阎超, 屈峰, 赵雅甜, 等. 航空航天 CFD 物理模型和计算方法的述评与挑战 [J]. 空气动力学学报, 2020, 第 38 卷(第 5 期): 829-57.
- [14] LEI H, ZHOU D, BAO Y, et al. Three-dimensional Improved Delayed Detached Eddy Simulation of a two-bladed vertical axis wind turbine [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 133: 235-48.
- [15] FANG Y, LI G, DUAN L, et al. Effect of surge motion on rotor aerodynamics and wake characteristics of a floating horizontal-axis wind turbine [J]. Energy, 2021, 218: 119519.
- [16] DUAN L, SUN Q, HE Z, LI G. Wake topology and energy recovery in floating horizontal-axis wind turbines with harmonic surge motion [J]. Energy, 2022, 260: 124907.
- [17] CHEN G, LIANG X-F, LI X-B. Modelling of wake dynamics and instabilities of a floating horizontalaxis wind turbine under surge motion [J]. Energy, 2022, 239: 122110.
- [18] FANG Y, DUAN L, HAN Z, et al. Numerical analysis of aerodynamic performance of a floating offshore wind turbine under pitch motion [J]. Energy, 2020, 192: 116621.
- [19] LI Z, DONG G, YANG X. Onset of wake meandering for a floating offshore wind turbine under side-to-side motion [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 934: A29.
- [20] BAZILEVS Y, KOROBENKO A, DENG X, YAN J. Novel structural modeling and mesh moving techniques for advanced fluid-structure interaction simulation of wind turbines: FSI OF WIND TURBINES [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2015, 102(3-4): 766-83.
- [21] 于子英. 基于弹性激励线理论的浮式—风机气动性能研究 [D]; 哈尔滨工程大学, 2019.
- [22] 王利东. 海上浮式风机叶片气动弹性分析 [D]; 大连理工大学, 2019.
- [23] SUBBULAKSHMI A, VERMA M, KEERTHANA M, et al. Recent advances in experimental and numerical methods for dynamic analysis of floating offshore wind turbines - An integrated review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2022, 164.
- [24] SEBASTIAN T, LACKNER M A. Characterization of the unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines: Unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines [J]. Wind Energy, 2013, 16(3): 339-52.
- [25] ROCKEL S, CAMP E, SCHMIDT J, et al. Experimental Study on Influence of Pitch Motion on the Wake of a Floating Wind Turbine Model [J]. Energies, 2014, 7(4): 1954-85.
- [26] LEE H, LEE D-J. Effects of platform motions on aerodynamic performance and unsteady wake evolution of a floating offshore wind turbine [J]. Renewable Energy, 2019, 143: 9-23.
- [27] LIN L, WANG K, VASSALOS D. Detecting wake performance of floating offshore wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2018, 156: 263-76.
- [28] CHEN Z, WANG X, GUO Y, KANG S. Numerical analysis of unsteady aerodynamic performance of floating offshore wind turbine under platform surge and pitch motions [J]. Renewable Energy, 2021, 163: 1849-70.
- [29] TRAN T-T, KIM D-H. The platform pitching motion of floating offshore wind turbine: A preliminary unsteady aerodynamic analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 142: 65-81.
- [30] TRAN T T, KIM D H. The aerodynamic interference effects of a floating offshore wind turbine experiencing platform pitching and yawing motions [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(2): 549-61.
- [31] FARRUGIA R, SANT T, MICALLEF D. Investigating the aerodynamic performance of a model offshore floating wind turbine [J]. Renewable Energy, 2014, 70: 24-30.

- [32] TRAN T T, KIM D-H. A CFD study into the influence of unsteady aerodynamic interference on wind turbine surge motion [J]. *Renewable Energy*, 2016, 90: 204-28.
- [33] KYLE R, FRÜH W-G. The transitional states of a floating wind turbine during high levels of surge [J]. *Renewable Energy*, 2022, 200: 1469-89.
- [34] LIENARD C, BOISARD R, DAUDIN C. Aerodynamic behavior of a floating offshore wind turbine [J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(9): 3835-47.