

# 海上浮式风机动力学仿真分析研究进展

邹晓阳, 潘卫国\*

(上海电力大学能源与机械工程学院, 上海市浦东新区 201306)

## Research Progress on Dynamic Simulation Analysis of Floating Offshore Wind Turbine

ZOU Xiaoyang, PAN Weiguo\*

(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Pudong New District, Shanghai 201306, China)

**摘要:** 海上浮式风机是向深远海获取风能的关键基础装备。由于其基础大幅度飘浮运动,且受到气动力、水动力及两者与结构产生的耦合作用,海上浮式风机的动力学特性复杂,研究其动力学有助于指导其设计、开发、运行和维护。从风机机身气动力学、飘浮基础水动力学、风浪流结构耦合动力学3个方面对近年来海上浮式风机动力学仿真分析的研究进展进行了综述分析,总结了目前该领域的研究成果和特点,指出了今后的研究趋势,以期为该领域的进一步研究提供参考。

**关键词:** 海上风电; 海上浮式风机; 气动力学; 水动力学; 风浪流结构耦合动力学; 仿真分析

**ABSTRACT:** Floating offshore wind turbine is the key and fundamental equipment for obtaining wind energy on deep sea. Because of its large floating base motions, floating offshore wind turbine is loaded by aerodynamic, hydrodynamic and their coupled actions with the structures, and is very complex in dynamic characteristics. Therefore, study on the dynamics plays a very important role in the design, development, operation and maintenance of floating offshore wind turbine. This paper introduced briefly the recent research progress of the dynamic simulation analysis of floating offshore wind turbine from the aspects of aerodynamics of wind turbine body, hydrodynamics of floating base and wind-wave-current-structure coupled dynamics. The results and characteristics of the current research were summarized, and the research trend in the future was shown, providing a reference for further investigation in this field.

基金项目: 上海市科委科技计划项目(18DZ1202100)。

Project Supported by Foundation of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (18DZ1202100).

**KEY WORDS:** offshore wind power; floating offshore wind turbine; aerodynamics; hydrodynamics; wind-wave-current-structure coupled dynamics; simulation analysis

## 0 引言

风电是清洁、可再生能源,据估计,全球可利用的风能约为20 TW,比可开发利用的水能大10倍<sup>[1]</sup>。根据国际能源署的路线图,2050年风电在全球发电量的占比将达到15%~18%,每年能减少4.8亿t的二氧化碳排放量<sup>[2]</sup>。陆上风机技术成熟,商业化运营取得了很大成功,但陆上风资源远没有海上风资源丰富和优良<sup>[3-5]</sup>。海上风能具有诸多优势,如高风速、低湍流强度、低风切变和风速稳定等,海上风机的噪声和视觉污染对人类影响也较小<sup>[6-7]</sup>。此外,海上风电场不占陆上土地,发展空间广阔,有利于发展风、光、氢等多能互补的综合能源应用平台。目前商业化投运的海上风电场主要位于浅海区域,以固定式风机为主要发电设备,然而全球80%以上的海上风资源位于水深超过60 m的海域<sup>[8]</sup>。因此,减碳背景下开发大规模深远海风电场是海上风电发展的必然趋势<sup>[9-10]</sup>,作为深远海风力发电设备的海上浮式风机将在其中起到至关重要的作用。

海上浮式风机动力学研究的方法主要有真机实测、模型试验和数值仿真。真机实测能够获得风机动力学响应的第一手数据,但其成本高、周期长,由于只针对特定环境下的特定风机,研究结果的推广性受限。模型试验是根据相似原理制

作原型的缩比模型，置于风洞和水池中进行风机动力学试验，通过改变试验参数可模拟不同结构、环境载荷和运行状况下的动力学特性，相对而言成本低、周期短，研究结果的推广性大大增强。但模型试验也存在一些问题，比较突出的是，风机基础的水池模型重点模拟重力和惯性力，要求满足弗汝德数相似条件，而机身的空气动力模拟要求满足雷诺数相似条件，然而两者难以同时满足，造成了“尺度效应”<sup>[1]</sup>，目前的一些研究方案还未能很好地解决这个问题。数值仿真研究的成本最低、周期最短，应用最为广泛，随着空气动力学、水动力学、结构动力学、数值计算的理论和方法，以及计算机技术的发展，近年来海上浮式风机机身的气动力学、飘浮基础的水动力学以及整机风浪流结构耦合动力学仿真分析的研究也得到了快速发展。

本文从风机机身气动力学、飘浮基础水动力学、风浪流结构耦合动力学3个方面对近年来海上浮式风机动力学仿真分析研究进展进行综述，并分析其发展趋势，以期为本领域的进一步研究提供参考。

## 1 海上浮式风机概述

浮式风机的概念最早由美国 Massachusetts 大学的 Heronemus 教授于 1972 年提出，经过几十年的试验和探索，全球首个商业化海上浮式风电场 Hywind 于 2017 年 12 月在英国正式投运<sup>[6]</sup>。近几年计划投产的海上浮式风电场还包括 Windfloat Atlantic、Flocan 5 Canary 等<sup>[11]</sup>。全球计划投产的海上浮式风电场大部分位于欧洲。中国风电产业发展迅速，风电总装机量位于世界前列，海上浮式风电处于起步阶段，位于福建、广东等地的首批数个海上风电项目正在开展安装和试运行工作。海上浮式风机由风机和海洋飘浮平台组成。飘浮平台是浮式风机的基础，包括浮体、锚链、锚等主要结构，有半潜式(semi-submersible)、立柱式(spar)、驳船式(barge)、张力腿式(tension-leg platform, TLP)4种基本类型(如图1所示)<sup>[11]</sup>，及其组合形成的多种飘浮平台。其中：半潜式平台通过不同浮筒吃水体积的变化来获得保持风机稳定

的恢复力矩；立柱式平台的重心低于浮心，从而产生恢复力矩；驳船式平台与船体类似，通过调节吃水线来保持稳定；张力腿式平台的锚索产生张力，使平台保持稳定。海上浮式风机的机身(包括风轮和塔筒)受到风力作用，其飘浮基础则受到波浪和洋流作用。气流、波浪和洋流对结构的作用复杂，作用机理各不相同，均可使风机整机产生大幅运动，改变流体与结构之间的相互作用，可见流体作用通过结构运动相互耦合在一起，进一步增加了风机受力的复杂性，使海上浮式风机动力学分析成为风力发电和海洋工程交叉领域的研究重点和难点。

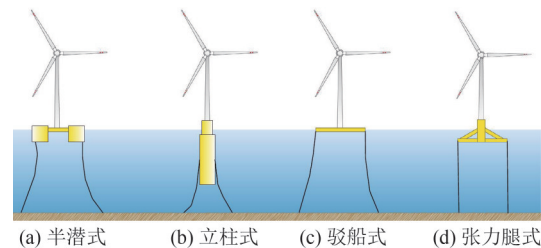


图1 海上浮式风机飘浮平台的4种基本类型

Fig. 1 Four types of floater platform of offshore floating wind turbine

## 2 海上浮式风机机身气动力学仿真分析

风机机身的气动力学研究方法主要有叶素动量理论(blade element momentum, BEM)、势流理论(potential flow, PF)和计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)，常用的气动力学仿真计算的软件或程序包含了其中一种或几种方法。如美国国家能源部可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)的研究人员在开源代码 OpenFOAM 中集成了基于 BEM 发展起来的致动线模型(actuator line model, ALM)程序、雷诺平均 NS 方程(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)和大涡模拟(large-eddy simulation, LES)等 CFD 计算程序，以实现风电场的气动力学模拟<sup>[12-13]</sup>。

任年鑫<sup>[14]</sup>利用  $k-\omega$  剪切应力输运(shear stress transport, SST)湍流模型对海上风机叶片翼型的气动性能进行了 CFD 数值仿真。周胡等<sup>[15-16]</sup>利用非结构化网格和  $k-\omega$  SST 湍流模型，在 OpenFOAM

平台上对均匀场和非均匀场中风机叶片的三维扰流场进行非定常CFD仿真计算,分析了叶片的气动性能。Li等<sup>[17]</sup>基于多体动力学和CFD方法建立了浮式风机气弹耦合仿真模型,湍流风场的边界条件和初始条件由Mann风湍流模型给出,还可对所建立的风机多体动力学模型进行扩展,以包含风机机械传动链。Sant等<sup>[18]</sup>分别利用BEM、势流理论中的广义动态尾流(generalized dynamic wake, GDW)模型和自由尾流模型(free-wake vortex model, FWVM)仿真分析了5 MW TLP浮式风机叶轮的推力和功率特性。Wen等<sup>[19]</sup>在开源软件QBlade中利用势流理论中的自由涡方法(free vortex method, FVM)分析了NREL 5 MW浮式风机在静态和动态偏航运行条件下叶片攻角的变化。刘利琴等<sup>[20]</sup>基于速度势的非定常面元法理论,考虑海上浮式风机基础运动引起的风速变化,建立了海上浮式风机的非定常面元法模型,以NREL 5 MW风机为例研究了基础运动对风机气动载荷的影响。Chen等<sup>[21]</sup>在CFD中采用动态网格、滑移网格和非定常RANS方法仿真分析了浮式风机在平台俯仰和浪涌筒谐运动单一或组合作用下的非定常气动特性,结果表明,平台运动对风机的气动特性产生了不利影响。Zhou等<sup>[22]</sup>考虑叶片周围的流场细节和波浪-空气自由表面的相互作用,利用CFD方法研究了湍流风和剪切风下海上浮式风机的响应,获得了流场的精细变化及其对风机气动性能的影响。

BEM简单、计算量小,在工程计算上应用广泛,目前气动分析的常用软件(如Bladed、SWT等)均包含了BEM。势流理论包括升力线理论、升力面理论和尾流理论,可以描述风机周围的三维气流场,其中GDW理论的基础是无黏、不可压缩流体的Laplace方程的势流解。ALM在BEM的基础上发展而来,计算精度比BEM和势流方法高,能获得风机尾流场,对网格模型和计算资源的要求比CFD低。CFD能最精确地模拟复杂流场的流动情况和传统势流理论无法精确模拟的流体运动,如空气涡流的变化等,结合网格技术还可实现风机气弹双向耦合仿真计算,其代价是仿真模型规模大,对计算资源要求高,一般在超算平

台上进行计算。考虑漂浮基础对风机气动性能的影响时,引入速度的变化,发展了BEM和势流理论的非定常分析方法,其中通常预先给定基础的运动规律,与基础的真实运动有一定差距。CFD可实现气液两相流分析,气动性能的仿真无需预先给定基础运动规律,通过非定常流体动力学算法和网格处理技术,进一步增强了模拟真实风流环境的能力。随着计算机技术的发展以及大型风机对机身气动性能要求的提高,将会越来越广泛地应用CFD来获得更精准的风场信息和高精度的风机气动力学性能。

### 3 海上浮式风机飘浮基础水动力学仿真分析

风机漂浮基础的水动力学研究方法主要有莫里森公式(Morison's equation, ME)、势流理论和CFD。目前海洋工程领域基于三维势流理论来计算浮式平台的水动力学性能的软件有很多,包括SASAM、HYDROSTAR、AQWA等,海上浮式风机飘浮基础的水动力学仿真计算工具在此基础上发展而来。

Kim等<sup>[23-25]</sup>开发了SWIM-MOTION-LINES(SML)模拟工具,用于分析线性或二阶频域波浪作用、锚泊结构非线性作用下飘浮平台的大幅低频慢飘运动。Dunbar等<sup>[26]</sup>在OpenFOAM平台上开发了飘浮基础6自由度水动力计算模块,并与FAST软件的仿真结果进行了对比,分析了DeepCWind半潜式基础的水动力学性能。Nematbakhsh等<sup>[27]</sup>基于CFD研究了张力腿式浮式风机的完全非线性波浪效应,并与势流求解器Simo-Riflex的结果进行了比较,但模型未包括气动载荷和风机的气弹响应。Uzunoglu等<sup>[28]</sup>对OC4研究项目参与者采用不同软件获得的半潜式浮式风机在无风和白噪声频谱的波浪激励下的纵荡、垂荡、俯仰运动和系泊载荷结果进行了定量分析,比较了利用莫里森公式、势流理论结合莫里森公式、势流理论附加二次阻尼3种方法计算的漂浮平台水动力学响应,以及利用不同锚链系统模型计算的系泊载荷,结果表明:势流理论计算的运动响应结果较为一致,莫里森公式在共振区之外

的结果与势流理论接近，系泊载荷的谱密度受锚链模型的影响较大，有限元模型的结果与准静态模型、集中质量模型的结果不同，后两者的结果接近。Bruinsma等<sup>[29]</sup>利用OC5研究项目的浮式风机在波浪载荷作用下的试验数据，验证了由OpenFOAM的Navier-Stokes/6-DOF求解器interDyMFoam与波浪生成工具箱waves2Foam相结合形成的、用于浮式风机基础的流体-结构复杂相互作用仿真的完全非线性数值波浪水池，发现了求解器的计算稳定性问题，并进一步研究了欠松弛法和预测-校正方法提高算法稳定性的效果。Chen等<sup>[30]</sup>基于有限差分法开发了考虑缆绳-海床相互作用和流体动力效应的系泊系统非线性动力学模型，通过OpenMOOR建立与OC3-Hywind立柱式浮式风机模型的动态链接，从而建立系泊系统与浮式风机的耦合动力学模型，研究系泊系统的非线性对浮式风机动力学特性的影响。Xu等<sup>[31]</sup>通过数值仿真比较线性波浪和完全非线性长冠波浪下OC4半潜式5 MW浮式风机漂浮平台的运动和系泊缆绳的响应，研究波浪非线性效应对浮式风机的影响，其中基于高效场求解器Harmonic Polynomial Cell在2D数值波浪水池中生成完全非线性波浪，然后生成动态链接库，将波浪运动数据导入到DTU开发的软件HAWC2中对浮式风机进行动力学分析，仿真结果表明：非线性波浪增大了风机的纵荡运动和锚索张力，波浪非线性的影响不可忽略。邓思佳等<sup>[32]</sup>基于非线性势流理论和摄动展开技术，建立了受波浪和系泊系统耦合作用的海上浮式风机基础二阶时域高阶边界元数值分析模型，研究了OC4-DeepCwind半潜式风机基础的动力响应，结果发现，某些频段波浪的非线性效应对响应的影响显著。Ullah等<sup>[33]</sup>研究了浮式风机平台运动时的非线性水静力刚度。

一般而言，细长结构物的特征尺寸与波长的比重足够小时，利用莫里森公式计算结构的水动力具有较高的精度。水流对结构的附加质量效应和绕射效应大于黏性效应时，需要用三维势流理论或CFD方法分析结构的水动力性能以达到较高的计算精度。CFD方法的计算精度最高，可以获得复杂海况下漂浮平台的水动力，如自由液面的

变化、平台脱流、波浪撞击和破碎等。利用2D或3D波浪和洋流模型对包含系泊结构在内的漂浮基础进行水动力学仿真计算，仿真模型的规模巨大，难以计算，而且考虑波浪和洋流的非线性效应时，容易产生计算稳定性问题，使得漂浮基础准确高效的水动力学仿真分析成为难点，这一难点在CFD方法中尤为突出。对于大部分浮式风机漂浮基础的水动力学耦合计算，浮体和锚链系统采用不同研究方法和模型，通过动态数据链接将水动力传递到漂浮基础计算模块，很大程度上缩小了模型、提高了计算稳定性，开发具有复杂功能的水动力学耦合计算子模块和提高计算精度是目前的研究重点和发展方向之一。CFD方法可集成到子模块中或将浮体和锚链系统建立在一个流体域中计算水动力，容易实现变工况和非定常分析，因此该方法是海上浮式风机动力学仿真分析的重要发展方向之一。

## 4 海上浮式风机风浪流结构耦合动力学仿真分析

### 4.1 海上浮式风机耦合动力学仿真分析方法

海上浮式风机的机身所受的气动力和漂浮基础所受的水动力，通过风机整机耦合在一起相互影响，共同决定了风机的运动。固定式风机的空气动力学和海洋工程漂浮平台的水动力学的传统分析方法在各自领域内均较为成熟，但浮式风机的风浪流结构耦合作用难以统一到这些传统成熟的分析方法中，如由平台运动引入的风机叶片运动速度分量的非定常特性不满足BEM的动量平衡假设，导致浮式风机风浪流结构的耦合动力学分析成为一大难题。目前，海上浮式风机风浪流结构耦合动力学仿真分析的方法是将成熟的气动分析模块、波浪分析模块、洋流分析模块和结构分析模块通过模块间的数据传递和交换来实现耦合计算。表1给出了几种海上浮式风机耦合动力学仿真分析软件<sup>[34]</sup>。

### 4.2 海上浮式风机耦合动力学仿真技术开发

Jonkman等<sup>[35]</sup>集成FAST、AeroDyn、HydroDyn等软件开发了水动力-气动力-结构动力学全耦合模拟工具，对驳船式浮式风机进行了受力分析。

表 1 海上浮式风机耦合动力学仿真分析软件

Tab. 1 Softwares for coupled dynamic simulation analysis of offshore floating wind turbine

软件	开发者	空气动力学	水动力学	结构动力学	锚链模型
FAST	NREL	BEM/GDW+DS	Airy+ME, Airy+PF+ME	Modal/MBS+FEM	QS
ADAMS	MSC+NREL+LUH	BEM/GDW+DS	Airy+ME, Airy+PF+ME	MBS	QS
Bladed (Advanced Hydro beta)	DNV GL	BEM/GDW+DS	PF+ME	Modal/MBS+FEM	QS
Simo+Riflex+AeroDyn	MARINTEK, NREL	BEM/GDW+DS	PF+ME	MBS	FEM/Dyn
HAWC2	RISO-DTU	BEM/GDW+DS	Airy+ME, Airy+PF+ME	MBS+FEM	FEM/Dyn
3DFloat	IFE-UMB	BEM/GDW	Airy+ME	FEM	FEM

注:DS表示动态失速(dynamic stall);MBS表示多体系统(multibody system);QS表示准静态法(quasi-static);Dyn表示动态法(dynamic);FEM表示有限元法(finite element method)。

Quallen 等<sup>[36]</sup>对 OC3 Hywind 模型进行 CFD 两相流仿真计算,利用准静态方法对锚泊进行模拟计算,并与 FAST 软件的计算结果进行了比较。Tran 等<sup>[37]</sup>分别利用 CFD 的重叠网格技术和 FAST 软件中的非定常叶素动量理论,对飘浮平台周期性运动的浮式风机的气动力和水动力进行了计算。李鹏飞等<sup>[38-39]</sup>考虑浮式基础的 6 自由度运动引起的风机叶片运动速度分量,在 ALM 的基础上提出了一种非稳态致动线模型 (unsteady ALM, UALM),并在 OpenFOAM 平台上利用两相流求解器 naoe-FOAM-SJTU 和 UALM 对浮式风机的动力学进行数值仿真,研究了周期性纵荡和纵摇运动时风机的推力、输出功率、尾涡结构。Li 等<sup>[40]</sup>基于 OpenFOAM 平台开发了求解器 FOWT-UALM-SJTU,用于浮式风机水动-气动-锚链系统耦合动力学仿真分析。Huang 等<sup>[41]</sup>利用该求解器对 spar 型浮式风机进行气动-水动力耦合仿真分析,研究风浪联合作用下风机的非定常气动力和基础的不同方向运动的相互影响。郑建才等<sup>[42]</sup>利用该求解器实现了平台水动力、风机气动载荷和锚链系泊系统载荷的耦合计算,分析了垂荡板形状对 OC3-Hywind spar NREL 5 MW 风机耦合响应的影响。Wang 等<sup>[43]</sup>采用开发的 Simo-Riflex-DMS 求解器进行非线性时域仿真计算,分析了不同环境下的 5 MW 垂直轴浮式风机的随机动力响应。闫发锁等<sup>[44]</sup>基于 FAST 开发了浮体、锚泊和风机子系统的水动力-气动全耦合数值计算程序,水动力计算采用二阶精度的混合波浪模型的莫里森公式,通过模块间的载荷和位移数据的传递形成完全耦合,研究了 5 MW spar 浮式风机的动力学响应特点。

Cheng<sup>[45]</sup>开发了 Simo-Riflex-AC 耦合求解器,用于对垂直轴浮式风机进行建模和仿真计算。Barooni 等<sup>[46]</sup>开发了浮式风机动力学数值仿真分析模型,考虑了风轮空气动力学、风机的多体动力学模型、波浪和洋流的动力学,以及系泊缆绳动力学。翟佳伟等<sup>[47]</sup>对 FAST 进行二次开发,引入了涡激力计算接口,假设流体处于稳定流动的状态,利用莫里森公式计算水动力,实现了对平台涡激、波激、气动力及系泊联合作用下 spar 浮式风机系统的运动响应计算。

### 4.3 海上浮式风机耦合动力学特性仿真分析

Liu 等<sup>[48]</sup>基于 OpenFOAM 软件仿真分析了不同的浮式平台运动对风机推力和扭矩的影响。Zhu 等<sup>[49]</sup>利用 Javafoil、WAMIT、SimMechanics 等软件对所设计的一种笼罩型叶轮浮式风机进行了气动-水动-结构-控制耦合动力学建模和仿真分析,其中叶片为刚体模型,风引起的海洋状态特征由 MPM 谱描述,波浪载荷基于力响应幅值算子计算。Ma 等<sup>[50]</sup>考虑风浪流耦合作用,基于 AQWA 模拟浮式风机的流体动力学特性和耦合效应,利用广义模态法处理结构和流体的相互作用,仿真分析了 TLP 和 Serbuoys-TLP 浮式风机的响应,结果表明, Serbuoys-TLP 能有效地抑制风机的纵荡运动。Ye 等<sup>[51]</sup>建立了立柱式浮式风机的刚体动力学模型,包括飘浮平台、塔筒和直驱传动链,利用两端自由边界条件,研究了浮式风机在波浪、洋流、风和系泊系统激励下的动力学响应,结果表明,传动链和飘浮平台之间的相互作用对风机的动力学响应影响很大。Li 等<sup>[52]</sup>在气动-水动力耦合计算软件 FAST 上建立了 DeepCWind 半潜式



构之间相互作用的规律,对于海上风机的设计优化、动力学性能和发电性能分析与预测、运行过程中的健康监测与维护等具有重要意义。目前,海上浮式风机风浪流结构耦合动力学仿真计算采用模块耦合的方法,气动力计算主要基于BEM方法和势流理论,水动力计算主要基于莫里森公式和势流理论,而这并未消除各方法的不足,因此该方法存在一定的局限性,适用于中低精度的仿真。在风与波浪联合作用于风机的仿真分析中,通常预先给定了风向和波浪运动方向的角度,与真实环境存在一定差距。海面风与波浪具有一定的相互作用,风向和波浪运动方向变化也比较复杂。CFD方法的气液两相流模型可将风浪流及其相互作用放在一个流体域计算,能更好模拟真实环境,仿真计算精度比其他方法高,是目前浮式风机动力学仿真方法的重要发展方向之一。浮式风机基础的大幅度运动带动叶片和塔筒产生大幅度刚性运动,叠加结构本身的弹性振动,使得结构周围的流场变化复杂,且弹性振动频率较高,需要较小的求解计算步长,增加了风机气弹仿真的难度。弹性振动将使结构的疲劳寿命大为缩短,这一问题对于具有大功率和大尺寸叶片的浮式风机更为突出,因此也是浮式风机风浪流结构耦合动力学仿真分析考虑的重点之一。浮式风机控制的目标主要是使捕获的风功率质量更高(即更大、更平稳),结构受到的载荷更小,控制的方法主要有主动变桨控制(如独立变桨控制)和利用阻尼器的主被动控制,利用更高精度的动力学模型、平衡兼顾综合多个控制目标、多种控制方法相结合,预计能够取得更好的控制效果。总之,目前已形成的海上浮式动力学仿真方法、技术以及已取得的大量仿真分析结果对海上浮式风机的设计开发具有重要作用,但在海上浮式风机风浪流结构耦合动力学仿真方面,计算精度高、计算效率高、成熟的一体化仿真方法和工具尚待开发。

## 5 结论

海上风能蕴含量大,向海洋特别是深远海进军来获取风能是减少碳排放的必然之举。海上浮式风机作为其中的关键基础发电装备,尽管已有

少数实现商业化运行,但技术远未成熟,目前其研究开发正受到工业界和学术界的高度重视。由于数值仿真具有成本低、周期短、适应范围广等优点,其在海上浮式风机的研发中必不可少,处于非常重要的地位。对近年来海上浮式风机动力学仿真分析研究进展进行了简要回顾,得到的主要结论如下:

1) 海上浮式风机机身气动力学仿真分析软件大部分基于BEM和势流理论,飘浮基础水动力学仿真分析软件则大部分基于莫里森公式和势流理论,通过与结构动力学分析模块结合,建立中低精度的模型来实现浮式风机风浪流结构耦合动力学仿真。

2) CFD方法对计算资源的要求很高,但能够模拟更为真实的浮式风机环境,给出更为精确的动力学仿真结果,与实验测量数据更相符,如低频非线性动力学响应的仿真结果,CFD在浮式风机动力学仿真分析上的应用将会越来越广泛。

3) 随着海上浮式风机往大功率和大尺寸叶片方向发展,以及复杂的风浪流工作环境带来的非线性因素,浮式风机流体与弹性结构的耦合动力学仿真分析和非线性动力学仿真分析将会进一步发展,动力学控制仿真研究也将随着浮式风机仿真方法和技术的发展而加深。

4) 开发计算精度高、计算效率高、计算稳定性好的仿真方法和工具,建立精度更高和更适合工程应用的动力学模型,以及开展更深入的动力学特性研究,将极大地促进海上浮式风机的发展。

## 参考文献

- [1] 万德成,程萍,黄扬,等.海上浮式风机气动力-水动力耦合分析研究进展[J].力学季刊,2017,38(3):385-397.  
WAN D C, CHENG P, HUANG Y, et al. Overview of study on aero- and hydro-dynamic interaction for floating offshore wind turbine[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2017, 38(3): 385-397.
- [2] IEA. Technology roadmap: wind energy 2013[R/OL]. (2013-10-04)[2022-02-04]. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/259e726a-348b-4a3c-9580-286eb365c098/Wind\\_2013\\_Roadmap.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/259e726a-348b-4a3c-9580-286eb365c098/Wind_2013_Roadmap.pdf).

- [3] 易侃, 张子良, 张皓, 等. 海上风能资源评估数值模拟技术现状及发展趋势[J]. 分布式能源, 2021, 6(1): 1-6.  
YI K, ZHANG Z L, ZHANG H, et al. Technical status and development trends of numerical modeling for offshore wind resource assessment[J]. Distributed Energy, 2021, 6(1): 1-6.
- [4] 杨航, 周羽生, 许振华, 等. 基于储能和序分量控制的直驱永磁风电系统非对称故障穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 60-68.  
YANG H, ZHOU Y S, XU Z H, et al. Asymmetric fault ride-through of a direct-drive permanent magnet wind power system based on the control of energy storage and sequence components[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 60-68.
- [5] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 75-85.  
FENG Z M, SUN G Q, TENG D H, et al. Reviews of LVRT technology for D-PMSG[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 75-85.
- [6] 王宾, 李红涛, 唐广银. 海上浮式风机研究进展概述[J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(S1): 220-225.  
WANG B, LI H T, TANG G Y. Overview of offshore floating wind turbines[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5(S1): 220-225.
- [7] 余浩, 肖彭瑶, 林勇, 等. 大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 30-38.  
YU H, XIAO P Y, LIN Y, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-fed wind farms[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 30-38.
- [8] 刘晓辉, 高人杰, 薛宇. 浮式风力发电机组现状及发展趋势综述[J]. 分布式能源, 2020, 5(3): 39-46.  
LIU X H, GAO R J, XUE Y. Current situation and future development trend of floating offshore wind turbine[J]. Distributed Energy, 2020, 5(3): 39-46.
- [9] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.  
JIANG H L, LIU Y X, FENG Y M, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th five-year plan under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64.
- [10] 王秀丽, 赵勃扬, 郑伊俊, 等. 海上风力发电及送出技术与就地制氢的发展概述[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 3-12.  
WANG X L, ZHAO B Y, ZHENG Y J, et al. A general survey of offshore wind power generation and transmission technologies and local hydrogen production[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 3-12.
- [11] MICALLEF D, REZAEIHA A. Floating offshore wind turbine aerodynamics: trends and future challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 152: 111696.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.  
REN N X. Offshore wind turbine aerodynamic performance and novel floating system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [15] 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.  
ZHOU H, WAN D C. Numerical simulation of the unsteady flow around wind turbines with different blades numbers[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics A, 2014, 29(4): 444-453.
- [16] 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.  
ZHOU H, ZHAO W C, WAN D C. Numerical simulation of 3D viscous flow field of wind turbine under nonuniform wind[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(1): 90-99.
- [17] LI Y, CASTRO A M, SINOKROT T, et al. Coupled multi-body dynamics and CFD for wind turbine simulation including explicit wind turbulence[J]. Renewable Energy, 2015, 76: 338-361.
- [18] SANT T, CUSCHIERI K. Comparing three aerodynamic models for predicting the thrust and power characteristics of yawed floating wind turbine rotors[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2016, 138(3): 031004.
- [19] WEN R B, TIAN X L, DONG X J, et al. A numerical study on the angle of attack to the blade of a horizontal-axis offshore floating wind turbine under static and dynamic yawed conditions[J]. Energy, 2019, 168: 1138-1156.
- [20] 刘利琴, 陈迪郁, 沈文君, 等. 基于非定常面元法的海上浮式风机气动性能研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(5):

- 16-27.
- LIU L Q, CHEN D Y, SHEN W J, et al. Study on aerodynamic characteristics of floating wind turbines with unsteady panel method[J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(5): 16-27.
- [21] CHEN Z W, WANG X D, GUO Y Z, et al. Numerical analysis of unsteady aerodynamic performance of floating offshore wind turbine under platform surge and pitch motions[J]. *Renewable Energy*, 2021, 163: 1849-1870.
- [22] ZHOU Y, XIAO Q, LIU Y C, et al. Exploring inflow wind condition on floating offshore wind turbine aerodynamic characterisation and platform motion prediction using blade resolved CFD simulation[J]. *Renewable Energy*, 2022, 182: 1060-1079.
- [23] KIM S. SWIM 2001: frequency-domain analysis of offshore platforms, user manual[R]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [24] KIM S. MOTION 2001: time-domain response analysis of offshore platforms, user manual[R]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [25] KIM S. LINES 2001: nonlinear static & dynamic analysis of mooring line/riser/tether arrays, user manual[R]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [26] 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.
- [27] NEMATBAKHSI A, BACHYNSKI E E, GAO Z, et al. Comparison of wave load effects on a TLP wind turbine by using computational fluid dynamics and potential flow theory approaches[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 53: 142-154.
- [28] UZUNOGLU E, SOARES C G. On the model uncertainty of wave induced platform motions and mooring loads of a semisubmersible based wind turbine [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 148: 277-285.
- [29] BRUINSMA N, PAULSEN B T, JACOBSEN N G. Validation and application of a fully nonlinear numerical wave tank for simulating floating offshore wind turbines [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 647-658.
- [30] CHEN L, BASU B, NIELSEN S R K. A coupled finite difference mooring dynamics model for floating offshore wind turbine analysis[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 162: 304-315.
- [31] XU K, SHAO Y L, GAO Z, et al. A study on fully nonlinear wave load effects on floating wind turbine [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 88: 216-240.
- [32] 邓思佳, 宁德志, 林琳, 等. 海上风机基础高阶水动力荷载数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2021, 36(6): 811-816.
- DENG S J, NING D Z, LIN L, et al. Numerical investigation of higher-order hydrodynamic loads on offshore wind turbine foundation[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2021, 36(6): 811-816.
- [33] ULLAH Z, MUHAMMAD N, CHOI D H. On the importance of nonlinear hydrostatic stiffness of offshore floating wind turbine platforms[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 113: 102730.
- [34] 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, June 08-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New York: ASME, 2014: 15.
- [35] JONKMAN J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine[M]. Ann Arbor, Michigan: ProQuest, 2007.
- [36] 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]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, June 30-July 05, 2013, Anchorage, Alaska, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013: 268-275.
- [37] 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.
- [38] 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.
- LI P F, WAN D C, LIU J C. Numerical simulations of wake flows of wind turbine based on actuator line model[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2016, 31(2): 127-134.
- [39] 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.
- LI P F. Numerical simulation of wake flows and coupled aero-hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

- [40] 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 International Offshore and Polar Engineering Conference, June 26-July, 1Rhodes, Greece: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016: 273-281.
- [41] HUANG Y, WAN D C. Investigation of interference effects between wind turbine and spar-type floating platform under combined wind-wave excitation[J]. Sustainability, 2020, 12: 246.
- [42] 郑建才, 赵伟文, 万德成. 垂荡板对浮式风机水动-气动耦合性能影响研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(1): 65-73.
- ZHENG J C, ZHAO W W, WAN D C. Effects of heave plate on coupling aero-hydrodynamic performances of floating offshore wind turbine[J]. The Ocean Engineering, 2022, 40(1): 65-73.
- [43] WANG K, MOAN T, HANSEN M O L. Stochastic dynamic response analysis of a floating vertical-axis wind turbine with a semi-submersible floater[J]. Wind Energy, 2016, 19(10): 1853-1870.
- [44] 闫发锁, 门骥远, 彭成. 深水 SPAR 风机系统全耦合动力响应分析研究 [J]. 船舶力学, 2017, 21(2): 159-167.
- YAN F S, MENG J Y, PENG C. Study on full coupling dynamic responses of a deepwater SPAR wind turbine system[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(2): 159-167.
- [45] CHENG Z, MADSEN H A, GAO Z, et al. A fully coupled method for numerical modeling and dynamic analysis of floating vertical axis wind turbines[J]. Renewable Energy, 2017, 107: 604-619.
- [46] BAROONI M, ALI N A, ASHURI T. An open-source comprehensive numerical model for dynamic response and loads analysis of floating offshore wind turbines[J]. Energy, 2018, 154: 442-454.
- [47] 翟佳伟, 唐友刚, 李焱, 等. 风浪流中涡激共振对 Spar 型浮式风机运动响应的影响[J]. 海洋工程, 2018, 36(4): 39-49.
- ZHAI J W, TANG Y G, LI Y, et al. Effect of vortex-induced resonance on motion response of Spar-type FOWT under wind current and wave[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(4): 39-49.
- [48] LIU Y C, XIAO Q, INCECIK A, et al. Investigation of the effects of platform motion on the aerodynamics of a floating offshore wind turbine[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(1): 95-101.
- [49] ZHU H Z, SUEYOSHI M, HU C H, et al. A study on a floating type shrouded wind turbine design, modeling and analysis[J]. Renewable Energy, 2019, 134: 1099-1113.
- [50] MA Z, REN N X, WANG Y, et al. A comprehensive study on the serbuoys offshore wind tension leg platform coupling dynamic response under typical operational conditions[J]. Energies, 2019, 12: 2067.
- [51] YE K, JI J C. Current, wave, wind and interaction induced dynamic response of a 5 MW spar-type offshore direct-drive wind turbine[J]. Engineering Structures, 2019, 178: 395-409.
- [52] LI L, LIU Y C, YUAN Z M, et al. Dynamic and structural performances of offshore floating wind turbines in turbulent wind flow[J]. Ocean Engineering, 2019, 179: 92-103.
- [53] 丁红岩, 韩彦青, 张浦阳, 等. 浮式风机变桨故障后停机的动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(8): 125-131.
- DING H Y, HAN Y Q, ZHANG P Y, et al. Dynamic analysis of floating wind turbine in blade pitch fault followed by shutdown[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8): 125-131.
- [54] 李英, 钱丽佳, 程阳. TLP 风机基础二阶动力响应研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(3): 52-59.
- LI Y, QIAN L J, CHENG Y. Investigation of the second-order hydrodynamic response of TLP wind turbine[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(3): 52-59.
- [55] 赵永生. 新型多立柱张力腿型浮式风力机概念设计与耦合动力特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- ZHAO Y S. Conceptual design and coupled dynamic analysis of a novel multi-column tension-leg-type floating wind turbine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [56] 陈嘉豪, 胡志强. 半潜式海上浮式风机气动阻尼特性研究[J]. 力学学报, 2019, 51(4): 1155-1165.
- CHEN J H, HU Z Q. Study on aerodynamic damping of semi-submersible floating wind turbine[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(4): 1155-1165.
- [57] 蔡恒, 朱仁传, 汪小佳, 等. 浮式风机在风浪联合作用下的动力响应分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(1): 118-125.
- CAI H, ZHU R C, WANG X J, et al. Dynamic response analysis of floating offshore wind turbine in combined wind and wave[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(1): 118-125.
- [58] LEIMEISTER M, KOLIOS M, COLLU M. Development and verification of an aero-hydro-servo-

- elastic coupled model of dynamics for FOWT, based on the MoWiT library[J]. *Energies*, 2020, 13: 1974.
- [59] MA Y, CHEN C H, FAN T H, et al. Research on motion inhibition method using an innovative type of mooring system for spar floating offshore wind turbine [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 223: 108644.
- [60] ZHOU Y, XIAO Q, PEYRARD C, et al. Assessing focused wave applicability on a coupled aero-hydro-mooring FOWT system using CFD approach[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 240: 109987.
- [61] WANG L, ROBERTSON A, JONKMAN J, et al. OC6 phase Ib: validation of the CFD predictions of difference-frequency wave excitation on a FOWT semisubmersible[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 241: 110026.
- [62] PUSTINA L, LUGNI C, BERNARDINI G, et al. Control of power generated by a floating offshore wind turbine perturbed by sea waves[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 109984.
- [63] HAN C L, NAGAMUNE R. Platform position control of floating wind turbines using aerodynamic force[J]. *Renewable Energy*, 2020, 151: 896-907.
- [64] SARKAR S, FITZGERALD B, BASU B. Individual blade pitch control of floating offshore wind turbines for load mitigation and power regulation[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 29(1): 305-315.
- [65] ROH C, HA Y J, AHN H J, et al. A comparative analysis of the characteristics of platform motion of a floating offshore wind turbine based on pitch controllers [J]. *Energies*, 2022, 15: 716.
- [66] PARK S, GLADE M, LACKNER M A. Multi-objective optimization of orthogonal TLCs for reducing fatigue and extreme loads of a floating offshore wind turbine[J]. *Engineering Structures*, 2020, 209: 110260.
- [67] GHABRAEI S, MORADI H, VOSSOUGH G. Investigation of the effect of the added mass fluctuation and lateral vibration absorbers on the vertical nonlinear vibrations of the offshore wind turbine[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 103: 1499-1515.

收稿日期: 2022-02-10。

作者简介:



邹晓阳

邹晓阳(1983), 男, 博士, 讲师, 研究方向为机械动力学、发电设备耦合动力学、振动噪声与控制, wangeming@163.com;



潘卫国

潘卫国(1967), 男, 博士, 教授, 研究方向为能源清洁利用、二氧化碳资源化利用, 本文通信作者, panweiguo@shiep.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)