

# 海上漂浮式风机平台的柔性效应研究进展



杨薛亮<sup>1</sup>, 罗杰<sup>1</sup>, 叶炜<sup>1</sup>, 李孙伟<sup>2</sup>, 吴华晓<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> 中国电建集团贵州工程有限公司, 贵州贵阳 550003

<sup>2</sup> 清华大学深圳国际研究生院, 广东深圳 518055

**摘要:** 为了降低漂浮式风机 (FOWT) 的平准化成本 (LCOE), FOWT 朝着大型化方向发展。平台构件也随之变长、变柔, 在外荷载作用下可能引发意外的柔性现象。另外, 一些平台在设计时故意引入柔性构件, 利用柔性效应提升平台的整体性能。这些柔性现象与通常将平台视为单刚体的假设不符。当前, 平台的柔性效应已引起学者们的广泛关注, 并开展了一系列的相关研究, 但缺乏系统性综述。为此, 本文先介绍了 FOWT 各主要构件从刚性体到柔性体建模的发展历程, 阐明了在数值模拟中考虑平台柔性效应的必要性。随后, 根据柔性效应的引入机制, 将柔性平台分为被动柔性平台和主动柔性平台, 并探讨了各类平台在考虑柔性效应后取得一些初步成果包括低估结构疲劳寿命、诱发共振放大平台运动响应等。最后, 本文指出了当前柔性平台研究存在的不足, 如在被动柔性平台方面, 缺乏公认的准则来预测考虑平台柔性效应的必要性, 节约计算资源; 在设计主动柔性平台时, 特征参数的选择和优化仍有较大的改进空间。

**关键词:** 海上漂浮式风机; 平台柔性效应; 数值模拟; 水池试验

**DOI:** [10.57237/j.jest.2024.05.001](https://doi.org/10.57237/j.jest.2024.05.001)

## Advances in Flexible Effect for Offshore Floating Wind Turbines Platform

Xueliang Yang<sup>1</sup>, Jie Luo<sup>1</sup>, Wei Ye<sup>1</sup>, Sunwei Li<sup>2</sup>, Huaxiao Wu<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>PowerChina Guizhou Engineering Corporation Limited, Guiyang 550003, R. P. China

<sup>2</sup>Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, R. P. China

**Abstract:** To reduce the Levelized Cost of Energy (LCOE) for floating offshore wind turbines (FOWTs), there is a trend towards their development in larger scales. Platform components have also become longer and more flexible, which may lead to unexpected flexible phenomena under external loads. Furthermore, some platforms intentionally incorporate flexible components during design to leverage these effects for enhancing overall performance. These flexible phenomena contradict the traditional assumption of treating platforms as rigid bodies. Currently, the flexible effects of platforms have garnered widespread academic attention, leading to a series of related studies, yet a systematic review is lacking. To address this, this paper first introduces the evolution of modeling FOWT components from rigid bodies to

基金项目: 国家重点研发计划资助 (基金号: 2019YFB1600700); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (基金号: Y220002, Y220013); 江苏省水利科技项目 (基金号: 2019009).

\*通信作者: 吴华晓, wuhx22@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2024-09-20; 接受日期: 2024-11-09; 在线出版日期: 2024-12-05

<http://www.energysci-tech.org>

flexible bodies, elucidating the necessity of considering platform flexibility effects in accurate modeling. Subsequently, based on the mechanism of introducing flexible effects, flexible platforms are categorized into passive and active types, with detailed discussions on the initial consensus reached in various platforms after considering flexible effects, such as underestimating structural fatigue life and inducing resonance to amplify platform motion responses. Finally, the paper highlights the shortcomings in current research on flexible platforms. For passive flexible platforms, there is a lack of recognized guidelines for predicting the necessity of considering platform flexibility effects to avoid wasting computational resources. In designing active flexible platforms, there is still significant room for improvement in selecting and optimizing characteristic parameters.

**Keywords:** Floating Offshore Wind Turbine; Platform Flexibility Effects ; Numerical Simulation; Wave-basin Test

## 1 引言

为了积极响应“双碳”政策,海上风能作为清洁的可再生能源备受业主们的青睐。海上风机分为漂浮式风机(FOWT)和固定式风机,能将海上风能转换成电能供人类生活生产[1]。与近海相比,深远海风能蕴藏更为丰富和均匀。有研究指出 FOWT 在水深超过 50 m 的海域比固定式风机开发风能更具成本效益[2],但 FOWT 的平准化成本(LCOE)依旧很高,商业化规模应用受限。美国可再生能源实验室(NREL)报告指出平台和系泊成本占 FOWT 总成本近 40% [3],因此减少平台耗材能有效降低 LCOE。此外, FOWT 大型化也是有效降低 LCOE 有效措施之一 [4]。然而,这些措施会使平台在设计时倾向使用更长、更细和更薄的构件。在外荷载作用下,结构可能会出现意外的柔性现象。因此,大型平台在数值模拟时被简化成六自由度单刚体,而忽略其柔性效应是有争议的。另外,一些平台在设计时主动引入柔性构件来减少耗材或部署柔性构件来增强结构整体性能等。然而,当前关于平台的柔性效应的研究缺乏系统整理。为方便后续学者迅速了解平台考虑柔性效应研究过程,本文综述了 FOWT 平台柔性效应的数值模拟和水池试验的最新成果。

## 2 FOWT 数值建模的柔性化过程

FOWT 根据不同的应用场景分为单刚体建模、修正单刚体建模、多刚体建模和混合刚-柔多体建模。其中混合刚-柔多体建模精度高,应用范围广,但构件之间、构件与外荷载耦合复杂,十分依赖计算资源。在混合建模中,叶片和塔筒通常基于梁理论或有限元方法进行柔性体假设,来考虑因明显振动导致的气弹性效应[5]。而较新的研究对舱室[6]、传动主轴[7]等也进

行了柔性体建模来考虑其振动引起的额外效果。类似地,随着平台部分构件变长、变细和变薄,平台的柔性效应也随之明显。另外,为了减少耗材和提高整体性能,一些新颖平台如多浮体平台或超柔平台在设计时主动引入柔性构件。因此,为了提高 FOWT 数值模拟预测的精确性,或进一步获取各构件的内力分布对截面进行优化设计减少耗材,考虑平台的柔性效应是不可避免的。

## 3 柔性平台研究现状

### 3.1 柔性平台分类

柔性平台是指考虑了平台构件弹性变形或振动影响的平台。按照柔性效应产生机理可分为被动柔性和主动柔性平台。被动柔性平台是指平台在设计时无意引入柔性构件而是由于某些构件长细比过大在外力作用下出现意外的柔性现象的平台。主动柔性平台则是设计时有意引入柔性构件,利用柔性效应增强结构性能的平台。

### 3.2 被动柔性平台

FOWT 平台根据稳定机理分为浮力稳定型半潜式见图 1(a)、系泊稳定型 TLP 式见图 1(b)和压载稳定型 Spar 式见图 1(c)。通常,当平台构件长细比超过某阈值,就可能导致平台在外荷载作用下出现明显的柔性现象。结合 FOWT 分类,被动柔性平台可以分为半潜式被动柔性、TLP 式被动柔性和 Spar 式被动柔性三种平台。表 1 列出了当前考虑平台被动柔性的相关研究,并给出了平台柔性现象出现的构件和部分相关参数。

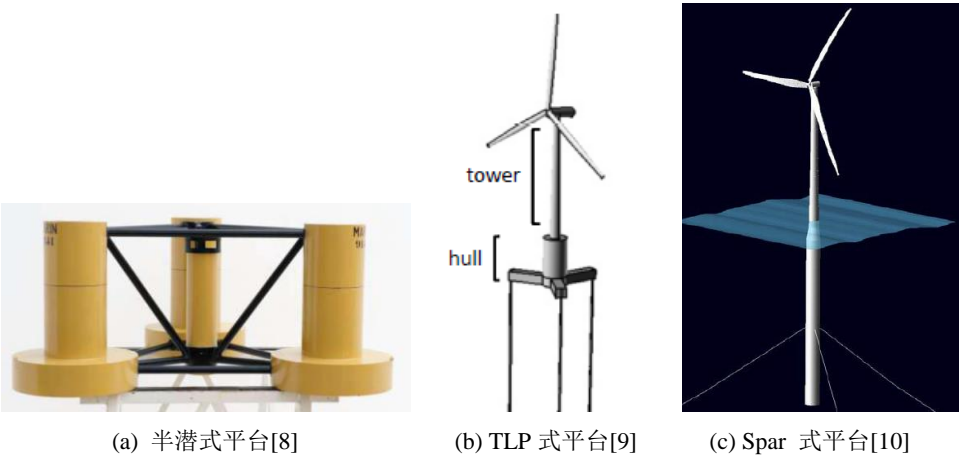


图 1 三种典型 FOWT 平台示意图

表 1 一些被动柔性平台的柔性构件和相关参数

柔性构件	年份	功率 (MW)	工况	尺寸描述 (m)
半潜式撑杆&立柱&浮筒	2013	5	极端	立柱直径 12, 6.5、立柱中心到中心 50、撑杆直径 1.6、参照 OC4 [8]
	2014	5	正常	立柱中心到中心 46、参照 WindFloat [11]
	2014	5	正常	参照 OC4 [8] & WindFloat [12]
	2015	5	正常	立柱中心到中心 46、参照 WindFloat [11]
	2009	5	正常&极端	立柱直径 10.7、立柱中心到中心 56.4、撑杆直径 1.8, 1.2、参照 WindFloat [12]
	2016	2	正常	参照 Fukushima MARIA [13]
	2018	10	正常&极端	立柱直径 13.4, 15.8, 12.05, 16.2、浮筒高度 7、浮筒宽度 17、参照 OO-Star [14]
	2022	10	正常&极端	立柱直径 12, 20、立柱中心到中心 48、立柱长度 39、参照 New semi-DUT [15]
	2022	15	--	平面占用 100×100、参照 NereWindTM [16]
TLP 式下船体&支腿	2012	5	正常&极端	立柱直径 6、立柱中心到中心 20.0、参照 WindStar TLP [17]
	2014	5	定常风&规则波	下船体长度 65、参照该 TLP [18]
	2018	5	正常	立柱直径 14、立柱高度 32、浮筒长度 21、参照 TLPWT3 [9]
Spar 式立柱	2016	10	仅白噪声波 仅极端波	spar 立柱直径 8.3 14、spar 立柱总长度 120、参照 a Spar [19]
	2016	5	正常	spar 立柱直径 7、参照 a Spar [20]
	2017	10	正常&极端	立柱长度、直径 65, 15、立柱中心到中心 26.3、参照 a triple spar [21]
	2017	5	正常	立柱直径 10, 13、立柱总长度 130、参照 the Windcrete Spar [22]
	2022	10	正常&极端	spar 立柱长度 18, 11.2、参照 a Spar [23]

3.2.1 半潜式被动柔性平台

Luan 等[8]采用梁单元模拟半潜式平台的撑杆系统，结果表明下三角撑杆是关键构件且内力对风浪夹角敏感。类似地，Kvittem 和 Moan [24]也采用梁单元研究撑杆的动力特性，指出忽略撑杆变形会低估塔架的短期疲劳损伤。Zhang 和 Ishihara [13]通过有限元分析也得到类似结论。接着，Aubault 等[12]通过有限元定量分析立柱的弹性变形。Zhao 等[15]则通过有限元讨论了平台考虑柔性效应对运动响应影响，结果表明平台的柔性会增强俯仰、垂荡和横荡的共振响应，加剧塔

架和锚泊系统的疲劳损伤。

3.2.2 TLP 式被动柔性平台

对于 TLP 平台，Zhao 等[17]用有限元方法考虑了下船体和支腿的柔性效应，结果表明考虑平台构件的柔性会降低纵摇和垂荡固有频率。类似地，Silva de Souza 和 Bachynski [9]采用柔性梁对下船体进行一系列数值模拟，结果指出平台考虑柔性会增加垂荡和纵摇运动的固有周期和响应幅度。Ma 等[18]进一步研究了 TLP 柔性下船体与系泊系统的强耦合作用。

3.2.3 Spar 式被动柔性平台

Spar 浮式平台的薄壁立柱可能是柔性效应的来源。Borg 等[19]针对 Spar 立柱提出了薄壁有限元模型来考虑波浪-结构耦合作用，并指出极端海况要考虑平台的柔性效应。Borg 等[25]进一步优化了该模型计算效率，解释了 Spar 柔性立柱能与外激励发生共振而放大运动响应。此外，Iijima 等[20]利用壳和梁单元对比刚性、半柔、全柔三种平台的动力特性，结果显示柔性会增大的平台运动幅值和周期。

与数值模拟相比，平台柔性效应的水池试验较少。Leroy 等[23]设计了 10 Mw Spar 的水弹性模型来研究大尺寸平台的非线性水弹性效应。Campos 等[22]通过比较 Spar 平台数值和水池试验结果，结果显示平台柔性

数值建模和水池试验数据的吻合程度更高，说明平台柔性建模精确度会更高。

上述这些研究表明，部分学者对 FOWT 平台的柔性效应十分感兴趣，并且初步结论表明一些平台考虑柔性效应是必要的，包括考虑平台的柔性效应会明显影响结构整体的运动幅值和周期、增加重要构件的内力，缩短结构疲劳寿命等。

3.3 主动柔性平台

主动柔性平台则是设计时主动引入柔性构件的平台，可分为摆式主动柔性平台、控制主动柔性平台、外部主动柔性平台和其他主动柔性平台。图 2 列出了一些主动柔性平台示意图。

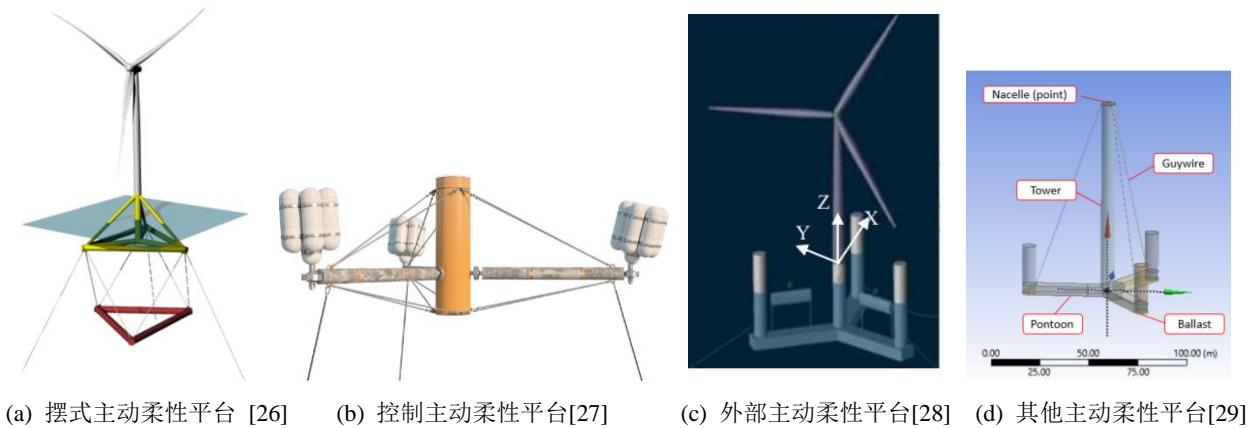


图 2 四种主动柔性平台代表示意图

3.3.1 摆式主动柔性平台

摆式主动柔性平台是通过弹性张力腱连接竖向多浮体的平台如 TELWIND、Tetra Spar 等。张力腱降低了 FOWT 重心和减少耗材。另外，摆式主动柔性平台通过收放调节张力腱长度，改变平台吃水，使得该类平台可以从港口湿拖到作业现场。表 2 总结了一些摆式主动柔性平台的部分参数。

表 2 一些摆式主动柔性平台的部分参数

类型	浮子外型	压载外型	柔性连接件数目	功率（Mw）	建筑材料
TELWIND [30]	圆柱	圆柱	6	10+	混凝土
TELWIND 变体 I [31].	正交十字	圆柱	8	6	混凝土、钢材
TELWIND 变体 II [32]	六边形	六边形	12	10	钢材
Tetra Spar [26]	四面体	三角形	6	3.6	模块钢管

TELWIND 是由六根预拉的张力腱连接两个混凝土圆柱组成的平台。Armesto 等[33]通过数值模拟研究了两个圆柱的耦合效应，说明两个圆柱运动不同步。Yang 等[30]通过数值模拟对柔性张力腱的疲劳损伤展开研究。Ward 等[34]将 TELWIND 上浮子圆柱改成正

交“十字”并评估了张力腱刚度对平台动态响应的影响，结果表明张力腱的刚度决定了多体平台运动的高频模态。类似地，Sakaris 等[32]提出了 TELWIND 的另一个变体，并对张力腱状态进行结构健康监测。

Tetra Spar 是另一种摆式柔性平台见图 2(a)，由四



面体浮体通过六根张力腿连接三角形配重组成。Pereyra 等[35]通过有限元方法对张力腿进行柔性建模并讨论了配重质量和深度对平台运动的影响。Thomsen 等[36]通过数值方法比较了 Tetra Spar 柔性模型的水动力特性, 结果表明柔性模型的动态响应略高于刚性模型的。Orszaghova 等[37]通过水池试验研究了 TetraSpar 的非线性水动力响应, 发现 Tetra Spar 多体平台存在亚谐共振现象。

### 3.3.2 控制主动柔性平台

控制主动柔性平台的代表是 SpiderFloat 平台 (SF, 见图 2(b))。SF 平台是一个仿生蜘蛛结构的平台, 由主立柱、浮力罐组、万向节、柔性梁和拉索致动系统组成。其中拉索致动系统基于算法控制拉索卷放快速调节柔性梁的变形来改变平台整体水动力外形, 因而将 SF 平台归为控制主动柔性。

考虑到 SF 平台柔性梁可能存在大变形, Damiani 和 Franchi [27]利用二阶梁理论推导了柔性梁和拉索的内力分布。Dinius 等[38]通过数值模拟讨论了三种主动驱动方法来控制 SF 平台运动响应的可行性, 结果表明三种方法都能减小平台的纵摇响应。Grant 等[39]、Tetteh 等[40]和 Stockhouse 等[41]通过数值仿真也得到了相似的结论, 此外这些主动驱动控制方案还能减少平台关键构件的内力。

### 3.3.3 外部主动柔性平台

外部主动柔性平台指附加自带柔性构件的子结构的平台如有风-浪能混合发电平台。其中波浪能转换器 (WEC) 的功率输出构件 (PTO) 在仿真时会简化成刚度元件和阻尼等柔性元件, 因此混合发电平台是一种外部主动柔性平台。本小节选用半潜式平台附加 WEC 作为代表, 余下平台结合机制类似, 不再赘述。

Peiffer 等[42]将点吸式球状 WEC 和 WindFloat 平台结合提出了 WindWaveFloat 浮式平台并通过数值模拟和水池试验证明了附加 WEC 能减小浮式平台动力响应和增加总发电量。Luan 等[28]通过柔性臂将三个扇翼型波能转换器 (SFC, 见图 2(c)) 安装在无撑杆的半潜式平台上, 并通过数值模拟发现 PTO 阻尼和 WEC 的质量是影响 WEC 功率的关键因素。Michailides 等[43]进一步通过数值模拟和水池试验研究半潜式附加 SFC 平台的整体动力特性, 结果表明 SFC 会略微改变原平台的固有周期, 增加平台部分原构件的内力, 但不影

响风能的输出功率。Zhang 等[44]将两种 WECs 集成到半潜式平台中, 数值模拟结果表明通过合理设计集成系统能提高浮式平台稳定性并且增加总体发电量。

### 3.3.4 其他主动柔性平台

除了上述三种主动柔性平台外, 剩下主动引入柔性构件的平台都可以归类到其他主动柔性平台, 如下面介绍的一类钢索牵引支撑平台见图 2(d)。Xiong 等[29]介绍了一种预应力钢绳牵引塔筒的轻质浮式平台, 通过数值模拟和分段模型水池试验研究了水弹性效应, 研究结果指出特定波浪周期或波长会放大平台构件的内力和运动响应。Suzuki 等[45]通过数值模拟和水池试验进一步解释了这类平台的荷载传递路径, 当平台框架对整体刚度的贡献度小于预应力钢绳系统, 钢绳是纵摇荷载的主要承担者。Suzuki 等[46]后续将直立塔筒改成倾斜塔筒并改用单点系泊, 通过数值模拟和水池试验证明修改后设计的可行性并指出这类设计会减小对风力条件的依赖。

## 4 讨论

FOWT 朝着大型化和轻质平台的方向发展, 来降低制造、安装成本。然而, 这些措施会使得 FOWT 在进行动力特性分析时不可避免考虑平台的柔性效应。实际上, 越来越多的研究基于梁理论或有限元方法对平台进行柔性建模或通过节段水弹性模型考虑柔性, 甚至有意引入柔性构件作为核心组件来增强平台的水动力性能。虽然平台柔性效应的研究已经取得一些共识, 如考虑平台的柔性会增加自振周期、部分构件内力、引起运动响应共振等, 但当前还存在一些不足。

在被动柔性方面, 目前尚无公认的标准来量化评估将柔性纳入平台建模的必要性。模拟平台的水弹性效应在数值和试验上都是昂贵和费时的, 考虑平台的柔性建模是计算效率和精确性的权衡。因此, 未来的研究应该制定一个评估浮式平台构件是否采用柔性建模的指南。比如在表 1 中, 承载 5 Mw 或 10 Mw 风机的部分平台均存柔性建模的构件; 有些在正常工况下就考虑平台的柔性效应, 而有些在极端情况才考虑平台的柔性效应; 此外, 平台在尺寸、几何形状和选定柔性构件上也有很大区别。期待后续研究能提出具有指导应用的经验公式包括内部因素 (如构件长细比、构件厚度或者安装风机兆瓦数) 和外部因素 (有义波高、波峰周期、风速等) 来预先评估平台在数值模拟时是否需要考虑柔性效应。

在主动柔性方面, 主动柔性平台的特征参数选取和优化依旧有很大的进步空间。参见表 2 的摆式主动柔性, 上下浮子水动力外型、上下浮子质量比、张力腱刚度和阻尼等应该进行寻优设计来确定让平台获得更佳的性能。类似的问题也出现在控制主动柔性平台的设计上, 柔性梁数目、长度、刚度、阻尼比、拉索系统的刚度比和阻尼比等还可以针对特定环境进一步优化。至于主动外部柔性, 尚未考虑平台的本身的柔性效应, 这也导致耗散波浪能效率低下。而其他主动柔性平台当前处于概念设计或者是水池试验阶段, 在实际工程将大预应力钢绳连接塔筒和平台挑战非常大。

## 5 结论

FOWT 规模化的主要障碍是较高的 LCOE, 大型化和轻质化是平台是目前设计趋势。然而, 这些措施不可避免增加平台柔性。因此, 本文对考虑 FOWT 平台柔性效应进行了综述, 得到以下结论。

被动柔性是传统平台部分细长构件无意出现的柔性现象。被动柔性平台将平台中特定构件用梁单元或者有限元进行模拟, 评估了这些构件弹性变形或者振动对结构整体动力特性影响。平台的柔性建模提高了模型预测响应的精度, 同时也能获得各构件的内力分布为后续的构件截面尺寸优化奠定基础。

而主动柔性则是平台有意引入柔性构件。例如摆式多体平台通过柔性张力腱悬挂配重减少耗材和降低重心; 还有控制主动柔性平台 (SF), 通过柔性梁耗散波浪能减少对上部风机的负面影响; 还有外部主动柔性, 如风浪能混合发电装置也能起到增强结构整体稳定性和提高整体发电效率等。值得注意的是, 主动引入柔性构件往往会引起平台的非线性水动响应, 因此其配置优化需要因地制宜。

虽然浮式平台的柔性化建模已经成为 FOWT 的发展趋势, 但当前尚无公认标准来量化分析考虑平台柔性效应的必要性, 此外在主动柔性方面设计特征参数选定和优化还有很大的探索空间。

## 参考文献

- [1] 丁勤卫, 李春, 叶舟, 等. 浮式风力机平台动态响应优化研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(05): 1405-1414.
- [2] 温斌荣, 田新亮, 李占伟, 等. 大型漂浮式风电装备耦合动力学研究: 历史、进展与挑战 [J]. 力学进展, 2022, 52(04):

731-808.

- [3] STEHLY TYLER, DUFFY PATRICK. 2021 Cost of Wind Energy Review [R]. United States, 2022.
- [4] 段磊, 李晔. 漂浮式海上大型风力机研究进展 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(12): 18-28.
- [5] 程友良, 曹淑刚, 万声权. 浮式风力机若干特征动力学问题综述 [J]. 海洋工程, 2024, 42(01): 165-186.
- [6] INOUE TOMOYA, ADILAH AHMAD, IIJIMA KAZUHIRO, et al. Discussion on Coupling Effect in Structural Load of FOWT for Condensing Wind and Wave Bins for Spectral Fatigue Analysis [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11), 937.
- [7] PARK YONGHUI, PARK HYUNCHUL, MA ZHE, et al. Multibody dynamic analysis of a wind turbine drivetrain in consideration of the shaft bending effect and a variable gear mesh including eccentricity and nacelle movement [J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 8: 604414.
- [8] LUAN CHENYU, GAO ZHEN, MOAN TORGEIR. Modelling and Analysis of a Semi-Submersible Wind Turbine With a Central Tower With Emphasis on the Brace System, F, 2013 [C]. Volume 8: Ocean Renewable Energy, ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- [9] SILVA DE SOUZA CARLOS EDUARDO, BACHYNSKI ERIN E. Effects of Hull Flexibility on the Structural Dynamics of a TLP Floating Wind Turbine, F, 2018 [C]. Volume 10: Ocean Renewable Energy, ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- [10] JONKMAN JASON. Definition of the Floating System for Phase IV of OC3 [R]: National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2010.
- [11] KVITTEM MARIT I., MOAN TORGEIR. Time domain analysis procedures for fatigue assessment of a semi-submersible wind turbine [J]. Marine Structures, 2015, 40: 38-59.
- [12] AUBAULT ALEXIA, CERMELLI CHRISTIAN, RODDIER DOMINIQUE. WindFloat: A Floating Foundation for Offshore Wind Turbines—Part III: Structural Analysis, F, 2009 [C]. Volume 1: Offshore Technology, ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- [13] ZHANG SHINING, ISHIHARA TAKESHI. Effects of multidirectional sea states and flexible foundation on dynamic response of floating offshore wind turbine system; proceedings of the Proceedings of the First International Symposium on Flutter and its Application, Tokyo, Japan, F, 2016 [C].

- [14] PEGALAJAR-JURADO ANTONIO, BREDMOSE HENRIK, BORG MICHAEL, et al. State-of-the-art model for the LIFES50+ OO-Star Wind Floater Semi 10MW floating wind turbine [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1104(1): 012024.
- [15] ZHAO ZHIXIN, WANG WENHUA, SHI WEI, et al. Effect of floating substructure flexibility of large-volume 10 MW offshore wind turbine semi-submersible platforms on dynamic response [J]. Ocean Engineering, 2022, 259: 111934.
- [16] SIZOVA SOFYA, MAILLOT ELISE, MOREAU SUZANNE, et al. Influence of the Semi-Submersible Platform Flexibility on the Dynamic Response of the Wind Turbine, F, 2022 [C]. Volume 8: Ocean Renewable Energy, ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- [17] ZHAO YONGSHENG, YANG JIANMIN, HE YANPING. Preliminary Design of a Multi-Column TLP Foundation for a 5-MW Offshore Wind Turbine [J]. Energies, 2012, 5(10): 3874-3891.
- [18] MA CHONG, IJIMA KAZUHIRO, NIHEI YASUNORI. Strongly Coupled Method for Predicting the Response of Flexible FOWT With Mooring and its Experimental Validation, F, 2014 [C]. Volume 7: Ocean Space Utilization; Professor Emeritus J. Randolph Paulling Honoring Symposium on Ocean Technology, ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- [19] BORG MICHAEL, HANSEN ANDERS MELCHIOR, BREDMOSE HENRIK. Floating substructure flexibility of large-volume 10MW offshore wind turbine platforms in dynamic calculations [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 753(8): 082024.
- [20] IJIMA K., SRINIVASAMURTHY S., FUJIKUBO M. Structural modeling for flexible floating offshore wind turbine: Flexible model vs rigid model; proceedings of the 2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean), F 6-8 Oct. 2016, 2016 [C].
- [21] LEMMER FRANK, AMANN FLORIAN, RAACH STEFFEN, et al. Definition of the swe-triplespar floating platform for the DTU 10MW reference wind turbine [J]. Stuttgart Wind Energy, 2016.
- [22] CAMPOS A., MOLINS C., TRUBAT P., et al. A 3D FEM model for floating wind turbines support structures [J]. Energy Procedia, 2017, 137: 177-185.
- [23] LEROY V., DELACROIX S., MERRIEN A., et al. Experimental investigation of the hydro-elastic response of a spar-type floating offshore wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2022, 255: 111430.
- [24] KVVITTEM MARIT I., MOAN TORGEIR. Frequency Versus Time Domain Fatigue Analysis of a Semisubmersible Wind Turbine Tower [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 137(1): 011901.
- [25] BORG MICHAEL, BREDMOSE HENRIK, HANSEN ANDERS M. Elastic Deformations of Floaters for Offshore Wind Turbines: Dynamic Modelling and Sectional Load Calculations, F, 2017 [C]. Volume 10: Ocean Renewable Energy, ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- [26] BORG MICHAEL, WALKUSCH JENSEN MORTEN, URQUHART SCOTT, et al. Technical Definition of the TetraSpar Demonstrator Floating Wind Turbine Foundation [J]. Energies, 2020, 13(18): 4911.
- [27] DAMIANI RICK, FRANCHI MAX. An innovative second-order design method for the structural optimization of the SpiderFLOAT offshore wind Platform [J]. Ocean Engineering, 2021, 228: 108792.
- [28] LUAN CHENYU, MICHAELIDES CONSTANTINE, GAO ZHEN, et al. Modeling and Analysis of a 5 MW Semi-Submersible Wind Turbine Combined With Three Flap-Type Wave Energy Converters, F, 2014 [C]. Volume 9B: Ocean Renewable Energy, ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- [29] XIONG JIANG, DO CARMO LUCAS H. S., VIEIRA DANIEL P., et al. Experimental and Numerical Comparison of the Wave Dynamics and Guy Wire Forces of a Very Light FOWT Considering Hydroelastic Behavior, F, 2018 [C]. ASME 2018 1st International Offshore Wind Technical Conference, ASME 2018 1st International Offshore Wind Technical Conference.
- [30] YANG YANG, BASHIR MUSA, WANG JIN, et al. Wind-wave coupling effects on the fatigue damage of tendons for a 10 MW multi-body floating wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 107909.
- [31] WARD JACOB C., GOUPEE ANDREW J., VISELLI ANTHONY M., et al. Experimental investigation into the dynamic behavior of a floating offshore wind turbine stabilized via a suspended counterweight [J]. Ocean Engineering, 2021, 228: 108906.
- [32] SAKARIS CHRISTOS S., YANG YANG, BASHIR MUSA, et al. Structural health monitoring of tendons in a multibody floating offshore wind turbine under varying environmental and operating conditions [J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1897-1914.
- [33] ARMESTO JOSÉ A., JURADO ALFONSO, GUANCHE RAÚL, et al. TELWIND: Numerical Analysis of a Floating Wind Turbine Supported by a Two Bodies Platform, F, 2018 [C]. Volume 10: Ocean Renewable Energy, ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.



- [34] WARD JACOB C., GOUPEE ANDREW J., VISELLI ANTHONY M., et al. The Effect of Counterweight Mass and Line Stiffness on the Global Dynamic Performance of a Hanging-Mass Floating Offshore Wind Turbine [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2021, 143(5): 052001.
- [35] PEREYRA BRANDON T., JIANG ZHIYU, GAO ZHEN, et al. Parametric Study of a Counter Weight Suspension System for the TetraSpar Floating Wind Turbine, F, 2018 [C]. ASME 2018 1st International Offshore Wind Technical Conference, ASME 2018 1st International Offshore Wind Technical Conference.
- [36] THOMSEN JONAS B., BERGUA ROGER, JONKMAN JASON, et al. Modeling the TetraSpar Floating Offshore Wind Turbine Foundation as a Flexible Structure in OrcaFlex and OpenFAST [J]. *Energies*, 2021, 14(23): 7866.
- [37] ORSZAGHOVA JANA, TAYLOR PAUL H., WOLGAMOT HUGH A., et al. Wave- and drag-driven subharmonic responses of a floating wind turbine [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 929: A32.
- [38] DINIUS JAMES D., DAMIANI RICK, JOHNSON KATHRYN, et al. Control Actuation Options for the SpiderFLOAT Floating Offshore Wind Substructure [M]. AIAA SCITECH 2022 Forum. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2021.
- [39] GRANT ELENYA, JOHNSON KATHRYN, DAMIANI RICK, et al. Buoyancy can ballast control for increased power generation of a floating offshore wind turbine with a light-weight semi-submersible platform [J]. *Applied Energy*, 2023, 330: 120287.
- [40] TETTEH EDEM Y, FLETCHER KEVIN, QIN CHRIS, et al. Active ballasting actuation for the SpiderFLOAT offshore wind turbine platform; proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum, F, 2022 [C].
- [41] STOCKHOUSE D., PHADNIS M., GRANT E., et al. Control of a Floating Wind Turbine on a Novel Actuated Platform; proceedings of the 2022 American Control Conference (ACC), F 8-10 June 2022, 2022 [C].
- [42] PEIFFER ANTOINE, RODDIER DOMINIQUE, AUBAULT ALEXIA. Design of a Point Absorber Inside the WindFloat Structure, F, 2011 [C]. Volume 5: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy, ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- [43] MICHAILIDES CONSTANTINE, GAO ZHEN, MOAN TORGEIR. Experimental and numerical study of the response of the offshore combined wind/wave energy concept SFC in extreme environmental conditions [J]. *Marine Structures*, 2016, 50: 35-54.
- [44] ZHANG HONGJIAN, ZHANG NINGCHUAN, CAO XINYU. Conceptualization and dynamic response of an integrated system with a semi-submersible floating wind turbine and two types of wave energy converters [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 269: 113517.
- [45] SUZUKI HIDEYUKI, XIONG JIANG, DO CARMO LUCAS H. S., et al. Elastic response of a light-weight floating support structure of FOWT with guywire supported tower [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24(4): 1015-1028.
- [46] SUZUKI HIDEYUKI, SHIOHARA HIROKI, SCHNEPF ANJA, et al. Wave and Wind Responses of a Very-Light FOWT with Guy-Wired-Supported Tower: Numerical and Experimental Studies [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(11): 841.