

海上浮动风力涡轮机平台的进展与挑战综述

孙翔

北京工商大学, 北京 102401, 中国

摘要: 全球对可再生能源的需求日益增长, 显著加速了浮动式海上风力涡轮机平台的发展, 尤其是在风能资源向深海扩展的背景下。本文全面概述了浮动平台的演变, 考察了诸如单桅平台、驳船平台、半潜式平台等传统设计, 以及混合式和仿生结构的最新进展。重点介绍了关键结构创新, 包括波浪能转换器和仿生设计的集成, 这些创新有助于提高稳定性、成本效益和能量输出。此外, 本文还回顾了平台优化技术的最新进展, 包括遗传算法、结构优化和分析优化方法, 这些技术提高了平台的稳定性和水动力性能。最后, 探讨了各种姿态控制和稳定性调节方法, 例如主动和半主动控制策略, 以及数据驱动和模型预测方法, 以了解它们在动态环境条件下提高稳定性和能源效率的潜力。本综述旨在为 FOWT 平台设计的持续进展和挑战提供宝贵的见解, 为未来的研究和大规模部署提供指导。

关键词: 浮动式海上风力发电机; 平台结构; 稳定性控制; 优化方法; 混合能量集成

Review on Advancements and Challenges of Offshore Floating Wind Turbine Platforms

Sun Xiang

Beijing Technology and Business University, Beijing 102401, China

Abstract: The increasing global demand for renewable energy has significantly accelerated the development of floating offshore wind turbine (FOWT) platforms, particularly as wind energy resources expand into deeper waters. This paper provides a comprehensive overview of the evolution of floating platforms, examining traditional designs such as spar, barge, semi-submersible, and tension leg platforms (TLP), along with recent advancements in hybrid and nature-inspired structures. Key structures innovations, including the integration of wave energy converter and biomimetic designs, are highlighted for their contributions to enhanced stability, cost efficiency, and energy output. Furthermore, the paper also reviews recent advancements in platform optimization techniques, including genetic algorithms, structural and analytical optimization methods, which improve platform stability and hydrodynamic performance. Finally, various attitude control and stability regulation methods, such as active and semi-active control strategies, as well as data-driven and model predictive approaches, are explored for their potential to improve stability and energy efficiency under dynamic environmental conditions. This review aims to provide valuable insights into the ongoing advancements and challenges in FOWT platform design, offering guidance for future research and large-scale deployment.

Keywords: Floating Offshore Wind Turbine (FOWT); Platform structure; stability control; Optimization method; Hybrid energy integration

随着化石燃料消耗的不断增长，能源枯竭和环境污染问题日益凸显。因此，向可再生能源转型，取代传统的化石燃料，已成为全球迫切的需求[1]。在全球能源转型和“双碳目标”的推动下，可再生能源的重要性更加凸显，风电成为未来能源发展的主导方向。根据全球风能理事会（GWEC）的统计，2023年全球海上风电装机容量新增10.8吉瓦，总装机容量达到75.2吉瓦。GWEC预测到2030年，全球海上风电装机容量将达到380吉瓦，这表明海上风电行业拥有巨大的增长潜力。事实上，发展风电具有广泛的经济和环境效益。鉴于大量可用的风能尚未开发，未来海上风电的潜力仍然巨大。

海上风电相较于陆上风电具有风能密度更高、利用年限更长、海域广阔、空间限制更少、节约土地资源、对人类日常生活影响小等优势[2]。此外，海上风电资源通常超过陆上风电，推动风电利用逐渐从陆地转向海洋，并呈现加速发展的趋势[3]。然而，随着海上能源开发向深海（水深超过60米）发展，传统的固定平台面临着材料消耗增加、建造成本高、安装困难等技术挑战。因此，浮式平台技术应运而生，成为深海风能开发的一种极具吸引力的替代方案[4]。借鉴海上油气行业的经验，浮式风力涡轮机系统克服了固定平台的局限性，为利用深海风资源提供了新的机遇[5]。浮式平台的完整性对风力涡轮机的安全、稳定和高效运行至关重要。然而，FOWT 平台的开发面临着诸多挑战，包括极端天气条件下的结构不稳定、高昂的材料和制造成本、复杂的流体动力学相互作用以及对高效能量传输解决方案的需求。此外，优化系泊系统并减少平台运动同时保持成本效益仍然是一个重大的技术障碍。鉴于这些挑战，本文首先介绍了几种传统的 FOWT 平台设计，然后回顾了旨在提高稳定性和能源效率的多功能和混合平台结构的最新进展。然后，本文探讨了各种优化方法，例如遗传算法和分析方法，以提高流体动力学性能和结构可靠性。最后，本文研究了运动控制和稳定性调节方法的最新进展，包括主动和半主动策略，以及利用数据驱动模型的预测控制方法。通过识别现有的局限性并讨论创新解决方案，本研究为未来的优化工作提供了宝贵的见解，指导设计更具弹性、更具成本效益和更高性能的浮动风电平台。

一、浮式平台结构的创新与发展

1. 早期浮式平台结构

过去六七十年来，浮式平台一直应用于海上油气领域，证明了其技术的可靠性，并积累了宝贵的经验教训。因此，油气行业的几种浮式平台类型已被应用于海上风力涡轮机（FOWT）。鉴于稳定性至关重要，传统的FOWT平台主要分为四类：（1）Spar 型平台；（2）驳船型平台；（3）半潜式平台（Semi-sub）和（4）TLP型平台。

Edwards等人对四种基本的浮动水力涡轮机（FOWT）概念进行了早期分析，展示了它们的相对优势和局限性。Spar 平台通过底部设有压载物的深吃水圆柱形结构实现稳定性。较低的重心和浮力相互作用增强了平台的稳定性，使其不易受洋流影响。然而，它需要深水（通常超过 100 米），因此不适用于浅水区域。

驳船采用水线面稳定系统。典型的驳船具有一个宽而浅的浮动平台。驳船式平台利用浮力原理抵消重力，易于安装且成本较低。然而，它对海水波动更敏感，因此稳定性较差。它通常仅适用于波浪和洋流波动相对较小的区域。半潜艇由于其较大的水线面面积而具有相当好的稳定性。平台倾斜会增加背风面的浮力，有助于恢复平衡。垂荡板的加入减轻了垂直运动，同时其设计也使其吃水较浅。它们通过多个由支撑连接的水下立柱平衡了稳定性和实用性，从而减少了倾斜和波浪引起的运动。

TLP通过系泊系统实现稳定性，其中，水下主体通过系泊缆绳系泊在海床上，并由中心立柱支撑风力涡轮机。系泊缆绳的高张力限制了平台的运动，使其几乎像一个刚性结构一样运行。这种增强的稳定性有助于更稳定地发电，并提高整个系统的可靠性。

2. 平台设计和结构的创新

随着海上风电向更深水域扩展，传统浮动式海上风力涡轮机（FOWT）平台的局限性日益凸显。为了应对这些挑战，研究人员开发了创新的平台设计，以增强稳定性、效率和适应性。本节将探讨 FOWT 平台结构的最新进展，重点介绍其关键创新、优势和局限性以及后续的优化措施。

最初的FOWT平台主要基于常规设计，但它们在极端条件下的稳定性和结构效率方面表现出很大的局限性。为此，陈晓提出了阶梯式短梁平台（SJTU-S4），证明了其在中等水深下的可行性，并提供了传统深海Spar平台的替代方案。王鑫通过加入月池进一步增强了Spar型平台，有效地减轻了平台对水平和旋转运动的动态响应。全潜式平台（FSP）的概念应运而生，成为传统半潜式平台的一种有前途的替代方案。该设计灵感源自立柱式、半潜式和张力腿平台（TLP）的综合特性，展现出卓越的抗系泊缆线故障能力，确保了恶劣环境下的运行稳定性。同时提出了一种斜柱式全潜平台，与传统的半潜式设计相比，其钢材成本降低了 12.8%，同时保持了易于拖曳的特性。Meng 等提出了一种先进的半潜式平台，其压载舱和垂荡板位置经过优化，在减轻风荷载、波浪力和单点效应引起的平台运动方面优于 VoltturnUS-S 平台。这些创新显著提高了平台的稳定性和固有频率特性。

随着技术的进步，融合多种稳定技术的混合平台越来越受到关注。Edwards综述了几种混合模型，例如 Cobra 半潜式 Spar 平台（Cobra Semi-Spar）、伸缩式风电平台（Telwind）、半潜式和张力腿风电塔（SSTLWT）以及 X1 Wind 浮动式风电（X1Wind）平台。这些模型集成了半潜式、Spar 和 TLP 元件以增强稳定性。半潜式 FOWT 平台采用斜柱和多段系泊缆，在提高稳定性的同时显著减少了纵荡和垂荡运动。然而，斜柱所需的额外结构加强件增加了材料成本。此外，受自然启发的设计也已成为优化浮动平台的一种有前途的方法。提出了一种仿生平台，其模型为王莲（VA）植物。通过整合叶片脉络结构，该设计将俯仰幅度降低了 38%，并稳定了功率输出。然而，受 VA 启发的平台表现出略低的浮力和吃水度，这可能会限制其对不同水深的适应性。

最近的创新越来越多地集中在集成波浪能转换器（WEC），以增强 FOWT 平台的能量收集能力和振动控制。周建提出了一种配备振荡水柱（OWC）WEC 的半潜式浮动平台，该平台分别将升沉、横摇和俯仰运动减少了 35%、55.4% 和 13.8%，同时优化了腔室空气孔尺寸以提高效率。基于这一概念，黄乐推出了一种内置自反应波浪能转换器（WEC）的半潜式平台，该平台在更宽的频率范围内实现了卓越的振动控制，同时提高了能量收集潜力。这些进步凸显了波浪能集成在优化浮动平台性能方面日益重要的作用。

FOWT 平台的发展已从早期的单桅纵梁式设计发展到混合型和受自然启发的结构，结合了全潜式平台和波浪能转换器，以提高稳定性、能源效率和弹性。尽管取得了这些进展，但在建造复杂性、材料成本和长期耐久性方面仍然存在挑战。随着海上风能的不断扩张，未来的研究将侧重于经济高效且稳定的 FOWT 平台，以支持大规模部署。

二、浮动平台优化新方法

尽管各种浮动平台（FOWT）平台已被设计出来，但开发高效的浮动平台仍然是一个关键的研究重点。近年来，人们对浮动平台的设计方法和理论框架进行了大量的研究，并涌现出众多旨在提高平台稳定性、水动力性能和成本效益的优化技术。本节将这些优化方法分为两大类：基于进化和遗传算法的优化，以及结构和分析优化技术。

1. 基于进化和遗传算法的优化

遗传算法（GA）和进化方法是平台设计优化中最广泛使用的方法之一。这些技术探索较大的参数空间，以识别能够增强平台稳定性、水动力性能和成本效益的最佳配置。Pan应用多目标遗传算法来优化半潜式浮动平

台，重点关注减轻重量和提高水动力效率。他们的研究揭示了共振特性的显著改善，并强调了系泊系统冗余在极端条件下的重要性。利用基于遗传算法（GA）的方法优化了 10 MW 半潜式平台的尺寸，与直接缩放 5 MW 平台相比，该设计更加紧凑、高效。

研究结果表明，结构优化的小型平台可以优于传统的柱式浮标和半潜式设计，在保持稳定性的同时降低材料成本。此外，将神经网络模型与遗传算法相结合，优化了 10 MW 风力涡轮机的系泊系统参数，有效地平衡了成本 and 安全性。这些进展显著改进了平台设计，同时最大限度地减少了计算工作量。

2. 结构和分析优化方法

除了进化算法之外，结构和分析方法已成为优化浮动平台的关键技术。这些方法专注于材料效率、结构优化和可靠性，解决了应力分布、多变量相互作用和不确定性管理等挑战。

拓扑优化方法在改进平台设计中发挥了关键作用。Saeed 等人引入了一种基于密度的拓扑优化方法，用于开发一种集风能、太阳能和波浪能系统于一体的轻型多功能平台。他们的方法将总质量减轻了 40.82%，同时提高了刚度和耐久性。同样，采用正交试验方法优化局部平台结构，在不改变质量或质心特性的情况下，最大应力降低了 22.12%。尽管这些方法有效，但在应用于大规模系统时，它们面临着计算复杂性和可扩展性的挑战。

此外，近年来，一些先进的优化方法被提出并应用。利用田口实验方法优化了一个半潜平台，使平台质量（不包括压载物）增加了 26%，同时在动态响应方面超越了 OC4 参考模型。Roach和Jeffrey也采用了田口实验方法来优化半潜平台，使平台质量（不包括压载物）增加了 26%，同时在动态响应方面超越了 OC4 参考模型。开发了适用于半潜式平台的广义尺度化方法，促进了风力涡轮机从 5 MW 到 30 MW 的过渡。他们的研究强调了关键的权衡：增加柱半径会增加质量和升沉周期，而调整柱距会影响稳心高度。浮动平台优化方法已从传统的基于遗传算法的方法发展到更先进的结构和分析优化。早期研究侧重于使用迭代遗传算法来优化平台尺寸和系泊配置，而最近的研究表明，结构和分析优化方法可以实现更高效、更可靠的平台配置，从而有效地平衡结构完整性、成本和性能。这些进展显著促进了浮动风力涡轮机（FOWT）平台的持续改进，为未来的大规模部署奠定了坚实的基础。

三、浮动平台的姿态控制与稳定性调节

由于易受风浪扰动和环境变化的影响，浮动风力涡轮机（FOWT）在维持平台稳定性和优化能量生产方面面临着巨大的挑战。为了应对这些挑战，研究人员研究了各种控制策略，旨在增强稳定性、减轻平台过度运动并提高能源效率。本节概述了平台姿态控制和稳定性调节方面的最新进展，并将讨论分为两个主要领域：主动和半主动控制策略、模型预测和数据驱动控制方法。

1. 平台稳定性的主动和半主动控制策略

早期对浮动风力涡轮机（FOWT）平台的研究主要依靠被动阻尼技术来减轻平台运动。然而，这些方法通常缺乏对不断变化的环境条件的适应性。为了克服这些局限性，研究人员开发了主动和半主动控制策略来增强平台稳定性。提出了一种多目标最优控制策略，该策略可以在预定范围内主动调整执行器的控制幅度，从而有效地平衡控制作用和机械应力。该方法延长了FOWT的使用寿命，同时提高了平台稳定性。

利用最优分离框架动态调节动力输出（PTO）系统的阻尼系数。他们的研究结果表明，该方法在保持灵活性的同时显著减少了平台运动，适用于多体浮动结构。然而，半主动控制策略在平衡能量效率和有效阻尼方面仍然面临挑战。研究强调了由风浪相互作用、材料疲劳和功率波动引起的FOWT固有的不稳定性。他们强调需要调整传统的控制技术来应对浮动平台的复杂动力学，这与固定式风力涡轮机有很大不同。

基于 CATIFES 框架的控制优化方法表明, FOWT与WEC的集成可以减少平台俯仰运动并提高总功率输出。尽管存在这些优势, 但协调多个浮体的复杂性构成了重大挑战, 需要进一步优化控制算法。

2. 模型预测和数据驱动控制方法

模型预测控制 (MPC) 已成为一种在保持能源效率的同时最小化平台运动的强大技术。应用基于 MPC 的方法来调节转子/发电机转速并减轻平台运动。他们的研究表明, MPC 优于传统的比例积分 (PI) 和线性二次积分 (LQI) 控制器, 尤其是在强风条件下。在此基础上, 通过结合耦合动力学模型来调节发电机扭矩和叶片螺距, 改进了 MPC 策略。虽然他们的方法有效地抑制了平台的喘振和俯仰运动, 但它引入了功率输出的波动, 突显了稳定性和能量一致性之间的权衡。然而, 与传统的总距控制相比, 数据驱动技术在抑制平台俯仰运动方面仍然存在局限性。未来的研究必须侧重于提高预测准确性和对不同海况的适应性。

随着海上风电行业的快速发展, 正在进行的研究必须优先改进控制系统, 以提高适应性、效率和实际应用性。FOWT 的控制策略开发已取得显著进展, 研究人员正在探索各种主动、半主动、预测和数据驱动的方法。虽然主动和半主动控制方法已被证明能够有效减少平台运动, 但仍需要进一步改进以平衡稳定性和能源效率。同时, 模型预测控制 (MPC) 和基于深度学习的方法通过预测环境变化和优化控制响应提供了创新的解决方案。然而, 在多体相互作用控制、环境适应性和实验验证等领域仍存在挑战。应对这些挑战对于最大限度地发挥浮动海上风力涡轮机 (FOWT) 能源系统的潜力并确保其在海上环境中长期生存至关重要。

四、结论

本文全面回顾了浮动海上风力涡轮机 (FOWT) 平台的进展和挑战, 研究了结构创新、优化技术和稳定性控制策略。研究者探索了各种平台设计, 包括单桅平台、驳船平台、半潜式平台和张力腿平台, 以及混合结构和自然启发结构的最新进展。遗传算法和结构分析等优化方法已证明可显著提高平台稳定性、流体动力学性能和成本效率。此外, 主动、半主动和预测方法等控制策略的进步提高了平台在动态环境条件下的稳定性和能源效率。尽管取得了这些成就, 但仍存在一些挑战, 尤其是在材料耐久性、极端天气适应性和能量传输效率方面。这些领域的持续创新将是释放 FOWT 技术全部潜力和支持全球向可再生能源转型的关键。

参考文献:

- [1] 王鑫, 曾晓燕. 海上风力涡轮机基础结构最新进展综述. 能源转换与管理, 2018, 158(2): 103-119. DOI:10.1016/j.enconman.2017.12.061.
- [2] Ozoemena M, Hasan R. 基于混合随机方法的1.5 MW风力涡轮机生命周期评估技术改进机会分析. 可再生能源, 2016. DOI:10.1016/j.renene.2016.03.012.
- [3] 杨斌, 段建. 基于混沌人工兔子算法的混合太阳-风-波浪系统能量最大化优化配置. 能源转换与管理, 2024(12): 322. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119143.
- [4] 陈晓, 王婷. 浮动式海上风电机组实验方法、仿真方法及尾流特性综述. 海洋科学与工程学报, 2025, 13(2): 208. DOI: 10.3390/jmse13020208.
- [5] Gulabani G, Karim B S A. 非常规风能综述. 工程与技术科学杂志, 2020, 52(4). DOI:10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.4.8.