

半潜型浮式风机平台研究综述

邓露¹, 王彪¹, 肖志颖¹, 宋晓萍²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湘电风能有限公司, 湖南湘潭 411102)

摘要: 介绍了半潜型浮式风机的发展现状, 基于已有的概念设计方案提出了半潜型浮式风机平台的初步设计流程图和优化设计方向, 综述了半潜型浮式风机平台在稳定性、水动力性能和强度分析等性能方面的研究, 提出了在这些研究领域中有待进一步解决的问题。结果表明, 目前半潜型浮式风机在技术上是可行的, 但高成本制约了大规模应用, 因此需在技术和成本上进一步优化。

关键词: 浮式风机; 半潜型平台; 概念设计; 稳定性; 水动力

中图分类号: TM315 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2016.04.001

Overview on Study of Semi-Submersible Platform for Floating Offshore Wind Turbines

DENG Lu¹, WANG Biao¹, XIAO Zhi-ying¹, SONG Xiao-ping²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. XEMC Windpower Co., Ltd., Hunan Xiangtan 411102, China)

Abstract: The developing status of the semi-submersible floating wind turbines is introduced. Based on the summary of existing achievements, a flow chart for the conceptual design and the directions for further optimization design are proposed. The research on the stability, hydrodynamics and strength analysis of the semi-submersible platform for floating offshore wind turbines is reviewed. Finally, the most critical issues needed to be addressed are identified. The results indicate that although the semi-submersible floating wind turbine is technically feasible, it still needs further optimization to reduce the cost for wide application in the future.

Key words: floating wind turbines; semi-submersible platform; conceptual design; stability; hydrodynamics

0 引言

海上风能资源丰富, 开发海上风电对改善我国能源结构有重要意义。目前, 海上风电场多采用固定式基础, 但在水深大于 50 m 的海域, 固定式基础因成本过高而不再适用。因此, 近年来研究人员提出了多种浮式风机基础的概念设计方案^[1], 其中, 半潜型浮式风机平台因其稳定性好、适用水深范围广和建造运输方便等优点而备受关注。Henderson^[2]和 Thiagarajan^[3]等总结了不同类型浮式风机的发展概况, 高伟^[4]介绍了不同国家的浮式风机项目的研究现状, 但关于半潜型浮式风机平台的概念设计和性能研究尚没有系统的总结与分析。

在此背景下, 本文介绍了半潜型浮式风机的发展现状, 基于已有的概念设计方案和规范研究提出了半潜型浮式风机平台的初步设计流程和今后优化设计的

方向, 综述了浮式平台在稳定性、水动力性能和强度分析等方面的研究进展, 并提出了该研究领域存在的若干问题, 旨在为浮式风机的研发提供一定的参考和建议。

1 半潜型浮式风机的发展现状

海上浮式风机的概念早在 1972 年就被 Heronemus^[5]提出, 但因技术和成本的制约, 直到近几年才开始逐渐发展起来。各国都在积极研发海上浮式风机基础, 并在概念设计、数值模拟和模型试验等方面取得了一定的进展。欧洲风能协会的报告^[6]指出, 截至 2013 年初, 全世界有 2 座全尺度和 3 座试验性的浮式风机已并网发电, 35 个浮式风机项目正在研发阶段中, 其中至少有 12 个半潜型浮式风机项目, 如表 1 所示。

收稿日期: 2016-01-07; 修回日期: 2016-04-14

基金项目: 国家 863 项目课题 (2013AA050603); 湖湘青年科技创新创业平台资助项目。

作者简介: 邓露 (1984—), 男, 博士、教授。主要从事海洋平台优化设计和车桥耦合振动等研究。

表 1 半潜型浮式风机项目

项目名称	国家/地区	进展状况
WindFloat	USA	2010 年全尺度模型试验
Mitsui Semi-sub	Japan	2013 年全尺度模型试验
DeepCwind	USA	2013 年 1/8 模型试验
HiPR Wind	EU	2013 年 1/10 模型试验
Winflo	France	2014 年全尺度模型试验
Vertiwind	France	2014 年全尺度模型试验
Mitsubishi	Japan	2015 年全尺度模型试验
DIWET Semi-sub	France	概念设计阶段
Tri-Floater	Netherlands	水槽试验阶段
Hitachi Semi-Sub	Japan	概念设计阶段
Shimizu Semi-sub	Japan	模型试验阶段
Windsea	Norway	模型试验阶段

2 半潜型浮式风机平台的概念设计

2.1 浮式平台的概念设计

Bulder 等^[7]提出了圆台形浮体、三角形平台和四边形平台等多种浮式基础的概念设计方案,从平台的稳定性、运动响应特性、用钢量、建造成本、维护等方面,综合研究了几种方案在水深 50 m 以上海域的可行性。分析结果表明,三角形平台是最佳方案,如图 1(a)所示。Zambrano 等^[8]在半潜型平台 MiniFloat 上安装了三组风机,采用时域分析法研究了平台在不同工况下的运动响应,结果显示平台纵摇的平均值小于 $\pm 5^\circ$,幅值小于 $\pm 15^\circ$,说明该平台运动性能良好。Ishihara 等^[9]设计了可搭载三组风机塔架的半潜型风机平台,如图 1(b)所示。通过数值模拟和缩尺模型试验研究了其在波浪和风荷载作用下的运动响应特征。Roddier 等^[10]从设计准则、水动力特性和强度等三个方面研究了 WindFloat (图 1(c))的可行性。Lefranc 等^[11]介绍了半潜型风机 WindSea 的最新进展,其搭载了三组 3.6 MW 的风机,支撑结构可以根据风向调整自己的位置以利于风机发电,试验数据表明前面的上风向风机发电不受影响,而后面的下风向风机发电量将比理论值减少 25%,说明三组风机的发电效果良好。Robertson 等^[12]为 OC4-DeepCwind 项目提出了半潜型浮式风机方案(图 1(d)),介绍了塔架、平台和系泊的属性,研究了平台的水静力和水动力特征。唐友刚、张亮^[13,14]等针对 5 MW 风机设计了三角形的半潜型浮式风机基础,研究了其在不同工况下的工作性能。邓露等^[15]提出了基于钢筋混凝土结构的半潜型浮式风机平台的概念设计方案,通过数值模拟进行了性能分析,证明了该方案的可行性。

总结不同研究人员提出的概念设计方案,可知:1)综合考虑半潜型风机平台的稳定性、水动力性能和建造安装成本等因素,三角形平台是一种较合理的结构形式;2)半潜型风机平台的初步设计流程如图 2 所示;

3)目前浮式风机平台的研究大部分是采用数值模拟的方法,缺乏试验验证,因此模型试验有待发展。

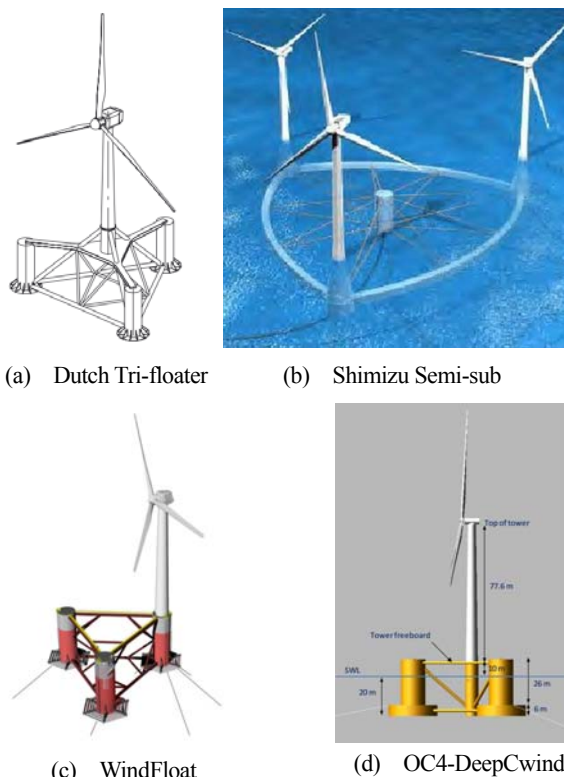


图 1 半潜型浮式风机基础的概念设计方案

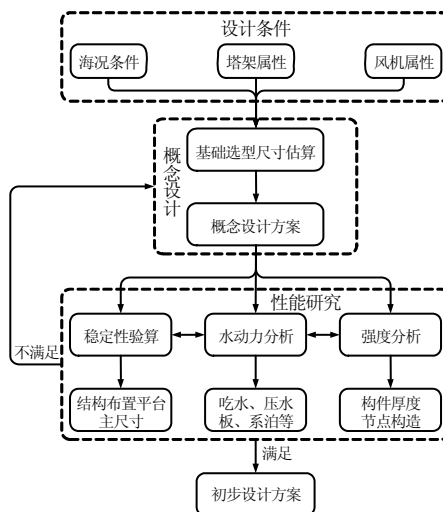


图 2 半潜型浮式风机平台初步设计流程图

2.2 浮式平台的设计规范

浮式风机的发展离不开专业设计规范的指导,但目前浮式风机领域的结构设计规范还非常缺乏,因此众多学者在探索新的概念设计方案的同时也在积极研究浮式风机的设计规范和指南。Lefranc^[16]指出石油平台正常作业时有人工操作,且平台中通常储存石油,因此石油平台的倾覆可能会引起石油泄漏甚至人员伤亡等严重后果,而浮式风机平台则不然,因此提出在

浮式风机平台的设计中应将环境载荷的分项系数由 1.3 减小至 1.15, 材料分项系数由 1.15 减小至 1.1 的建议。Ronold 等^[17]从设计准则与安全等级、场地条件、载荷与载荷模型、稳定性和系泊系统等方面提出了规范发展过程中需解决的重点问题。Cordle 等^[18]指出现行与浮式风机相关的设计标准和指南是参考固定式风机和浮式石油平台的经验, 评估了这些规范的适用性, 提出浮式风机规范发展过程中需要解决的关键技术。Sirmivas 等^[19]提出 IEC 系列标准可用于风机和塔架等海面以上的结构, ISO 系列标准和美国的 API 可用于海面以下的结构, 而 ABS、BV、DNV 和 GL 等船级社的设计指南可作为规范的补充。

综上可知, 目前的海上浮式风机设计规范基本是参考海上移动平台的规范, 但两者的功能要求、安全等级和环境载荷均有不同, 特别是浮式风机所受到的气动载荷一般要远大于石油平台。因此, 需要专门研究和制定浮式风机的设计规范, 重点研究合理的安全等级和安全系数、结构的稳定性、系泊系统设计等问题。

2.3 浮式平台的优化设计

目前, 高成本制约了浮式平台的大规模应用, 因此需在技术和成本上进一步优化。Henderson^[20]从结构布置、塔架个数(单体或多体)、建造材料(钢或混凝土)、系泊类型等方面评价了不同设计方案, 指出浮式风机平台选型的主要指标是成本、可靠度和安全性, 主要挑战是经济性、平台稳定性、运动响应引起的结构疲劳和在浅水中布置系泊等问题。Musial 等^[21]提出了浮式风机成本优化设计的创新技术, 如采用轻骨料混凝土建造浮式平台和轻质材料建造塔架和风机, 增大风轮旋转的速度, 被动控制平台运动等。Wayman^[22]针对 5 MW 风机提出了驳船式、Tri-floater、TLP 和单立柱基础四种浮式风机基础的概念方案, 以浮式平台的纵摇稳定性为标准, 初步估算平台的尺寸, 综合考虑材料、建造和安装的成本, 选出最优初步设计方案为改进的驳船式和 TLP 基础。Huijs 等^[23]采用集成设计法综合考虑浮式平台、系泊和控制系统的性能, 对 Tri-Floater 进行了优化设计, 结果显示, 优化后风机的质量和成本明显降低。

结合不同学者提出的概念设计方案和优化设计的方法, 预测浮式风机优化设计的可能发展方向: 1) 采用新材料和新工艺建造浮式平台和塔架以减少建造和安装的成本。注意结构的耐久性, 降低全寿命成本, 因此可研究钢筋混凝土或新型复合材料等建造平台和塔架的可行性和经济性; 2) 基于水动力性能的参数分析和优化设计, 以浮式风机系统的成本最小化为目标, 以平台的稳定性、水动力性能和强度等为约束条件, 从建造、安装和维护等方面综合考虑浮式基础的优化设计。

3 半潜型浮式风机平台的性能研究

3.1 浮式平台的稳性研究

浮式平台的稳性由其浮心和重心的相对位置决定, 与其水线面面积相关。因此稳性决定半潜型浮式平台的整体结构布置和主要尺寸, 如立柱的间距与直径以及平台的干舷等参数^[1]。

Musial 等^[21]指出石油平台必须提供更多的稳性以保证石油平台不会因失稳倾斜而造成石油泄漏和人员伤亡, 而浮式风机平台的倾覆则不会引起如此严重的后果, 这说明风机平台的安全等级可以小于石油平台。Casale 等^[24]研究了六边形浮式平台在拖运过程中的静稳性, 根据力矩曲线图的稳性消失角反算出浮式平台在托运过程中由海洋环境载荷引起的最大倾斜角不应该超过 10° 。张亮等^[25]采用 SESAM 软件对三立柱半潜型浮式风机平台进行了完整稳性和破舱稳性的数值模拟, 分析了不同工况下复原力矩曲线与风倾力矩曲线的关系, 对比规范稳性衡准, 模拟结果证明浮式平台在完整或单个舱室破损时, 均仍可保证风机正常发电。Huijs 等^[26]指出在正常作业工况下, 浮式平台的倾斜角不应超过 10° , 风机的水平加速度不应超过 3 m/s^2 。Collu^[27]研究了浮式风机平台在船坞中组装、海上拖运和指定海域安装等非运行阶段的稳性评价标准, 参考石油平台的相关规范建立了浮式风机平台的稳性评价标准和规范体系, 总结了相近行业的稳性研究方法, 为浮式风机规范的制定提供了参考。

综上可知, 浮式平台的稳性研究主要是考察平台在不同工况下的衡准是否满足规范限值。然而, 目前浮式风机平台的稳性衡准均是参考石油平台的规范, 但两者的结构形式和安全等级不同: 1) 风机系统属于高耸结构, 风轮所受的风推力会使平台遭受巨大的风倾力矩, 这也是引起稳定性问题的主要因素; 2) 石油平台倾覆后可能造成石油泄漏甚至人员伤亡的严重后果, 风机则不然。因此, 有必要根据浮式风机平台的结构和功能特点, 专门研究其在不同工况(作业和自存工况、拖运和安装等)下的稳定衡准。

目前, 浮式风机的工程数量和发展时间都远不及传统的海洋船舶和石油平台, 因此, 在尚未积累足够的经验之前, 可借鉴后者的相关规范来研究浮式风机平台的稳性衡准。现将浮式风机规范 DNV-OS-J103^[28]与海上移动平台规范中的稳性衡准进行对比分析, 为制定浮式风机平台的稳性衡准提供参考, 如表 2 和表 3 所示。

由表 2 和表 3 可知: 1) 不同规范的面积比限值均为 1.3, 力矩比限值基本为 2, 但石油平台失稳倾覆后可能会造成石油泄漏甚至人员伤亡的严重后果, 而风机平台则不然, 因此浮式风机平台采用与石油平台一样的安全系数, 过于保守; 2) NMD 和 CCG 规范给出了石油平台的第一交角限值, 而 DNV 规范并未规

定, 但为了捕获更多风能以保证风机的发电效率, 需使风轮与风向保持一定夹角, 因此应设定在作业工况下的第一交角限值, 自存工况可不考虑; 3) DNV 规

范未规定初稳心高度限值, 位于塔架顶部的风机重达数百吨, 将提高整体结构的重心, 不利于结构的稳定, 因此浮式风机的初稳心高度限值有待研究。

表 2 不同规范的完整稳性衡准

衡准	NMD ^[29]	CCG ^[30]	IMO ^[31,32]	ABS ^[33]	CCS ^[34]	DNV
面积比	≥1.3	≥1.3	≥1.3	≥1.3	≥1.3	≥1.3
第一交角	≤17°	≤15°	无规定	无规定	无规定	无规定
第二交角	≥30°	无规定	无规定	无规定	无规定	无规定
初稳心高度	1、作业、运输和生存工况≥1.0 m; 2、临时工况≥0.30 m	1、作业、运输和生存工况≥1.0 m; 2、临时工况≥0.30 m	≥0.15 m	≥0.0 m	≥0.15 m	无规定
最小复原力臂	从正浮到第二交角区间内为正值	无规定	从正浮到第二交角区间内为正值	从正浮到第二交角区间内为正值	从正浮到第二交角区间内为正值	从正浮到第二交角区间内为正值

表 3 不同规范的破舱稳性衡准

衡准指标	NMD	CCG	IMO	ABS	CCS	DNV
力矩比	无规定	无规定	≥2	≥2	≥2	无规定
静平衡角	无规定	≤15°	无规定	无规定	无规定	无规定
第一交角	≤17°	无规定	≤17°	≤17°	≤17°	无规定
角度范围	无规定	无规定	≥7°	≥7°	≥7°	≥7°
面积比	≥1.0	≥1.0	无规定	无规定	无规定	无规定

3.2 浮式平台的水动力性能研究

水动力性能的研究主要是分析浮式平台在波浪载荷作用下的运动规律, 考察平台在不同周期、单位波幅的波浪载荷作用下的运动响应幅值, 即幅频响应曲线 (Response Amplitude Operators, RAOs), 并提出控制平台位移或振动的措施, 使浮式平台的振动周期避开主要波浪周期范围, 防止两者发生共振。

半潜型浮式平台的横荡、纵荡和艏摇自振周期大于 100 s, 远离波浪周期; 横摇、纵摇自振周期为 30 s~60 s, 这比较接近波浪周期; 而垂荡自振周期为 20 s~50 s, 这与一般的波浪周期更相近^[35], 所以垂荡运动较其他自由度的运动更容易与波浪发生共振。根据半潜型平台的特点, 研究人员就如何预报和改善浮式平台的水动力性能做了大量数值分析和试验研究, 并提出了一些垂荡响应的控制措施。Bindingsbø 等^[36]提出了一种深吃水式半潜式平台, 通过对比吃水为 21 m 与 40 m 时平台的垂荡响应, 发现后者的垂荡较前者显著减小。Cermelli 等^[37]在半潜型平台 MiniFloat 的立柱底部设置垂荡板, 通过数值模拟计算垂荡的 RAOs, 证明垂荡板能够显著的减小平台垂荡运动的幅值, 并延长垂荡的固有周期。Chakrabarti 等^[38]提出了一种桁架式浮筒结构 (Truss-pontoon) 的半潜型平台概念, 数值模拟和模型试验的结果证明, 垂荡板产生的附加质量和阻尼能够显著减小垂荡激励力。刘鲲等^[39]根据调谐质量阻尼器 (TMD) 的原理, 设计了一种活动式垂荡板, 数值计算的结果显示, 活动式垂荡板对半潜式平台垂荡响应控制的效果比传统固定式更好。

半潜型风机平台与石油平台的水动力原理类似, 因此可借鉴后者的经验研究风机平台的水动力性能。Ishihara 等^[40]在半潜型浮式风机平台的立柱底部设置了垂荡板, 并进行了一系列的数值模拟和水池试验, 研究了垂荡板对平台动力响应的影响, 研究发现垂荡板使垂荡运动在额定和极端海况下的自振周期延长, 响应幅值减小。朱航等^[41]设计了适用于风机发电的 Truss-spar-buoy 浮式平台, 采用数值方法计算了平台在中国南海 10 年重现期自存海况下的时域运动响应, 结果显示, 垂荡和纵摇都避开了南海波浪的主要频率段。

半潜型平台的垂荡响应控制一直是热点问题, 借鉴石油平台的研究成果, 风机平台的垂荡响应控制主要有以下方法:

- 1) 增大平台吃水。增大吃水可减小垂荡响应幅值, 增加系统的稳性, 但会增加建造成本, 因此需研究经济的吃水深度。
- 2) 设置垂荡板结构。垂荡板能增大平台的垂向附加质量和阻尼, 增大垂荡的固有周期, 减小其幅值, 也会增加平台所受的波浪载荷, 设计时需综合考虑垂荡板的形状、尺寸、数目、间距和放置深度等因素。
- 3) 在系泊链上增设质量块。当平台上移时, 质量块对系泊施加向下的附加力可限制平台上升, 但增设质量块对系泊链的强度要求增大, 需全面考虑质量块的质量、数量和间距等参数。

3.3 浮式平台的强度分析

强度分析是计算浮式平台在风、浪、流等多种环

境载荷共同作用下的应力或内力,并验算构件(包括钢结构和混凝土结构)的承载能力。Roddier 等^[10]采用梁单元建立浮式风机 WindFloat 的数值模型,计算出连接桁架节点和塔架底部等应力集中处弯曲应力的时程曲线,重点研究了热点部位的强度和疲劳,结果显示,气动载荷对塔架底部以及与塔架相连的立柱强度起控制作用。唐友刚等^[42]综合考虑海洋环境荷载及气动荷载,采用 SESAM 软件建立了半潜式风机的整体有限元模型,根据莫里森公式和势流理论分别计算构件及立柱的水动力载荷,运用叶素理论计算风机叶片的空气动力载荷,最后计算了浮式基础结构的应力分布和变形分布,并根据 ABS 规范校核了构件的强度,结果显示,连接塔柱与立柱斜撑的两端部位应力较大。邓露等^[15]采用随机性设计波法计算波浪载荷的响应谱,获得最不利的设计波参数,计算了不同载荷作用下的内力,分析了钢筋混凝土浮式风机平台的关键节点的强度。白艳彬等^[43]依据三维绕射理论计算了波浪诱导载荷与运动,采用谱分析法确定设计波参数,对不同工况下的波浪载荷进行了预报,并建立了三维有限元模型完成了平台结构总体强度分析。

总结前人的研究,可得半潜型浮式风机平台在受力计算和强度分析方面的研究存在以下不足:1)目前关于浮式风机平台强度的研究较少,且主要集中在平台整体强度的定性分析,对于关键热点区域(如立柱与杆件或塔架等构件的连接部位等)的强度分析仍有待详细研究;2)浮式风机平台强度分析的难点仍是风、浪、流等多种环境载荷共同作用下各构件的内力和应力计算以及最不利工况的确定,设计波和设计谱法可应用于波浪载荷的计算;3)与石油平台不同,风荷载对浮式风机平台强度的影响非常显著,甚至对某些易出现疲劳破坏部位(如塔架与平台连接处)的强度起决定性作用。

4 结论

本文总结了半潜型浮式风机平台的概念设计方案和设计规范,提出了优化措施和设计流程图,综述了浮式平台在稳性、水动力性能和强度分析等方面的研究,提出了以下结论和待研究的问题:

1)目前半潜型浮式风机在技术上已可行,但高成本却制约了其大规模应用,需在技术和成本上进一步优化。

2)浮式风机平台的稳性衡准是参考石油平台的经验,但两者的结构形式、功能要求和安全等级不同,因此风机平台的稳性衡准有待研究。

3)可借鉴石油平台的研究成果来改善浮式风机平台的水动力性能,如对半潜型平台垂荡响应的控制。

4)浮式风机平台强度分析的难点是多种环境荷载作用下不同构件的内力和应力的计算以及最不利工况

的确定,尤其需要注意的是风荷载对塔架底部的疲劳强度影响显著。

参考文献:

- [1] Butterfield S, Musial W, Jonkman J, et al. Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbine[R]. Colorado: NREL, 2007.
- [2] Henderson A R, Witcher D. Floating Offshore Wind Energy-a Review of the Current Status and an Assessment of the Prospects[J]. Wind Engineering, 2010, 34(1): 1-16.
- [3] Thiagarajan K P, Dagher H J. A Review of Floating Platform Concepts for Offshore Wind Energy Generation[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(2): 1-6.
- [4] 高伟, 李春, 叶舟. 深海漂浮式风力机研究及最新进展[J]. 中国工程科学, 2014, 16(2): 79-87.
- [5] Heronemus W. E. Pollution-Free Energy From Offshore Winds[C]// Proceedings of the 8th Annual Conference and Exposition Marine Technology Society. 1972.
- [6] Arapogianni A, Genachte A, Ochagavia R M, et al. Deep Water-The Next Step for Offshore Wind Energy[R]. Brussels: European Wind Energy Association, 2013.
- [7] Bulder B H, Van Hees M T, Henderson A, et al. Study to Feasibility of and Boundary Conditions for Floating Offshore Wind Turbines[R]. 2002.
- [8] Zambrano T, MacCready T, Kiceniuk T, et al. Dynamic Modeling of Deepwater Offshore Wind Turbine Structures in Gulf of Mexico Storm Conditions[C]// 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2006.
- [9] Ishihara T, Phuc P V. A Study on the Dynamic Response of a Semi-submersible Floating Offshore Wind Turbine System Part 1: A Water tank test[C]// ICWE12. 2007.
- [10] Roddier D, Cermelli C, Aubault A, et al. Wind Float: a Floating Foundation for Offshore Wind Turbines[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2010(2): 1-34.
- [11] Lefranc M, Torud A. Three Wind Turbines on One Floating Unit, Feasibility, Design and Cost[C]// Offshore Technology Conference. 2011.
- [12] Robertson A, Jonkman J, Masciola M, et al. Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4[R]. Colorado: NREL, 2014.
- [13] 唐友刚, 桂龙, 曹茜, 等. 海上风机半潜型基础概念设计与水动力性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(11): 1314-1319.
- [14] 吴海涛, 张亮, 马勇, 等. 半潜式海上浮式风力机平台随机响应特性分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版,

- 2014, 42(5): 111-115.
- [15] 邓露, 王彪, 肖志颖, 等. 钢筋混凝土浮式风机平台概念设计与性能研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2016(1): 11-15.
- [16] Lefranc M. Design of Floating Offshore Wind Mills[C]// The 2nd European Offshore Wind Conference. 2007.
- [17] Ronold K O, Landet E, Jørgensen E R, et al. Design Standards for Floating Wind Turbine Structures[C]// Proceedings of the European Wind Energy Conference. 2011.
- [18] Cordle A, Jonkman J. State of the Art in Floating Wind Turbine Design Tools[C]// The 21st International Offshore and Polar Engineering Conference. 2011.
- [19] Simivas S, Musial W, Bailey B, et al. Assessment of Offshore Wind System Design, Safety, and Operation Standards[R]. Colorado: NREL, 2014.
- [20] Henderson A R, Vugts J H. Prospects for Floating Offshore Wind Energy[C]// Proceedings of the European Wind Energy Conference. 2001.
- [21] Musial W, Butterfield S, Boone A. Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines[R]. Colorado: NREL, 2003.
- [22] Wayman, E. Coupled Dynamics and Economic Analysis of Floating Wind Turbine Systems[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [23] Huijs F, Mikx J, Savenije F, et al. Integrated Design of Floater, Mooring and Control System for a Semi-submersible Floating Wind Turbine[C]// European Wind Energy Association Offshore Conference. 2013.
- [24] Casale C, Lembo E, Serri L, et al. Preliminary Design of a Floating Wind Turbine Support Structure and Relevant System Cost Assessment[J]. Wind Engineering, 2010, 34(1): 29-50.
- [25] 张亮, 邓慧静. 浮式风机半潜平台稳性数值分析[J]. 应用科技, 2011, 38(10): 13-17.
- [26] Huijs F, Bruijn R, Savenije F. Concept Design Verification of a Semi-submersible Floating Wind Turbine using Coupled Simulations[J]. Energy Procedia, 2014, 53: 2-12.
- [27] Collu M, Maggi A, Gualeni P, et al. Stability Requirements for Floating Offshore Wind Turbine(FOWT) during Assembly and Temporary Phases: Overview and Application [J]. Ocean Engineering, 2014, 84: 164-175.
- [28] DNV-OS-J103, Design of Floating Wind Turbine Structures[S]. 2013.
- [29] Norwegian Maritime Directorate. Regulations for Mobile Offshore Units[S]. 1992.
- [30] Canadian Coast Guard. Standards Respecting Mobile Offshore Drilling Units[S]. 1995.
- [31] IMO. International Code on Intact Stability[S]. 2008.
- [32] IMO. Code for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units[S]. 2009.
- [33] ABS. Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units[S]. 2008.
- [34] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[S]. 2012.
- [35] DNV-RP-F205, Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures[S]. 2010.
- [36] Bindingsbø A U, Bjørset A. Deep Draft Semi Submersible[C]// Proceeding of 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2002.
- [37] Cermelli C A, Roddier D G, Busso C C. MINIFLOAT: A Novel Concept of Minimal Floating Platform for Marginal Field Development[C]// Proceedings of The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. 2004.
- [38] Chakrabarti S, Barnett J, Kanchi H, et al. Design Analysis of a Truss-pontoon Semisubmersible Concept in Deep Water[J]. Ocean Engineering, 2007, 34: 621-629.
- [39] 刘鲲, 朱航, 欧进萍. TMD 在半潜式平台垂荡响应控制中的应用[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 205-210.
- [40] Ishihara T, Waris M, Sukegawa H. A Study on Influence of Heave Plate on Dynamic Response of Floating Offshore Wind Turbine System[C]// Proceedings of the 3rd European Offshore Wind Conference and Exhibition. 2009.
- [41] 朱航, 欧进萍. Truss-spar-buoy 风机承载浮式平台的概念设计[J]. 船舶力学, 2012, 16(11): 1267-1273.
- [42] 唐友刚, 王涵, 陶海成, 等. 海上风机半潜型浮式基础结构设计及整体强度分析[J]. 中国造船, 2013, 54(3): 85-93.
- [43] 白艳彬, 刘俊, 薛鸿祥, 等. 深水半潜式钻井平台总体强度分析[J]. 中国海洋平台, 2010, 25(2): 22-27.