新型多立柱张力腿式浮动风力机概念模型试验研究

赵永生, 杨建民, 何炎平*, 彭涛, 寇雨丰

上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 海洋工程国家重点实验室, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

*联系人, Email: hyp110@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2016-06-12; 接受日期: 2016-07-27; 网络出版日期: 2016-10-21

国家重点基础研究发展计划资助项目(编号: 2014CB046205)

摘要 近海深水区域蕴藏着丰富的高品质风能, 海上浮动风力机是目前开发深水风能最具潜力的新装备. 首先分析了开展海上浮动风力机水池模型试验时需要考虑的相似准则, 并根据其受力情况综合选取了合适的相似准则. 采用基于风轮推力相似而优化设计的模型叶片建立了一套风力机模型, 有效解决浮式风力机模型试验中的“尺度效应”问题. 本文对所提出的新型多立柱张力腿式浮动风力机概念(WindStar Tension Leg Platform System, WindStar TLP System)进行了水池模型试验研究, 模型试验缩尺比为150. 试验中测定了其空气动力、水动力和结构动力特性, 得到了其在不同环境条件下的运动响应和总体性能. 模型试验结果可为该新型多立柱张力腿式浮动风力机概念的进一步研究提供参考依据.

关键词 浮动风力机, 模型试验, 尺度效应, WindStar TLP, 动力响应

PACS: 89.30.Ee, 47.35.+i, 47.85.Dh, 47.85.Gj

风能利用已从陆上发展到海上, 正致力向近海深水区域(>30 m)发展. 海上浮动风力机(Floating Offshore Wind Turbine)是目前开发近海深水风能最具潜力的新装备, 已成为国内外海上风电研究的热点领域. 浮动风力机是一种全新的海洋工程结构物, 工作过程中受到多种载荷的联合作用, 是一个复杂的空气动力-水动力-控制-结构弹性与系泊系统相耦合的多体系统. 近年来, 世界各国的相关研究机构对此进行了比较广泛的研究, 纷纷提出了新型的深水浮式风力机概念, 并部分开展了水池模型试验研究^[1-3]. 与常规的海洋结

构物水池模型试验不同, 浮动风力机水池模型试验需要增加一套风力机模型以正确模拟其空气动力性能, 从而获得其耦合动力特性. 因此如何选取合适的相似准则以及建立风力机的空气动力学模型是开展相关试验的难点和关键点.

上海交通大学海洋工程国家重点实验室于2012年提出了一种新型多立柱张力腿式浮动风力机概念(WindStar TLP System)^[4]. 通过在风、浪、流水池对其进行模型试验研究, 测定了该新型多立柱张力腿式浮动风力机概念在不同运行工况下的运动响应和总体

引用格式: 赵永生, 杨建民, 何炎平, 等. 新型多立柱张力腿式浮动风力机概念模型试验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 124712
Zhao Y S, Yang J M, He Y P, et al. Experimental study of a new multi-column tension leg-type floating wind turbine concept (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 124712, doi: [10.1360/SSPMA2016-00291](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00291)

性能. 主要的测试内容包括: 静水衰减试验、白噪声试验、规则波试验、不规则波试验, 以及风、浪、流联合作用试验等. 试验测定了WindStar TLP System的运动固有周期与阻尼、运动幅值响应算子(Response Amplitude Operator, RAO)、不同环境条件下的运动响应和张腿张力等关键性能参数, 验证了WindStar TLP System的可行性.

1 新型多立柱张力腿式浮动风力机概念简介

WindStar TLP System主要由3部分组成: 顶部的风轮系统(Rotor Nacelle Assembly, RNA)、中部的塔筒结构和下部的张力腿式支撑平台(WindStar TLP). 风轮系统位于塔筒顶端, 采用美国国家可再生能源实验室发布的海上5 MW风力机(NREL Offshore 5 MW Baseline Wind Turbine)^[5]. 该风力机为传统三叶片、上风型风机, 其控制系统采用了变速、变桨控制策略. WindStar TLP包括了1个圆形中央立柱、3个均布的周向立柱、浮箱、筋腱支撑结构和张力腿式系泊系统等, 其中周向立柱的截面形式为具有圆角的矩形, 可与下浮箱结构直接连接, 从而有利于降低建造难度且易于模块化设计和安装. 风力机塔筒为壳体式圆锥形结构, 直接安装于中央立柱上以更好地传递塔筒顶端的风轮载荷和减小塔筒根部应力集中. 周向立柱可为整体提供浮力和稳性, 从而有利于改善传统张力腿平台在拖航、安装过程中稳性不足的情况. 采用了3组外延式筋腱支撑结构以提高其纵摇和回转刚度, 从而增强其纵摇和回转稳定性. 张力腿式系泊系统采用了3组相同的张力腿, 每组张力腿包含两根聚酯材料制成的筋腱, 分别连接于3组筋腱支撑结构和3组位于海底的固定锚系. WindStar TLP System各部分组成如图1所示.

2 相似法则

海上浮式风力机水池模型试验的目的在于正确预报其水动力学特性、空气动力学特性和结构动力学特性, 因此如何将实物转化为模型试验所需的物理模型是其关键所在. 通常海洋工程水池模型试验中, 模型和实体的两个系统应满足几何相似、运动相似和动力相似3个相似条件. 由于风力机塔筒结构柔性对总

图1 (网络版彩图) WindStar TLP System概念示意图

Figure 1 (Color online) Illustration of the proposed WindStar TLP system.

体运动性能(纵摇运动)存在较大影响, 因此风力机塔筒结构还需要考虑结构刚度相似. 海上浮动风力机水池模型试验时需考虑的相似条件如下:

(1) 几何相似: $\frac{L_s}{L_m} = \lambda$, λ 为缩尺比, 下标m及s分别表示模型和实型. 模型试验中涉及线性尺度参数的都必须满足几何相似条件, 如长度、宽度、型深、吃水、重心坐标、水深、波高、波长等;

(2) 弗汝德数(Froude Number)相似: $\frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}}$, 保证模型和实体之间重力和惯性力的正确相似关系. 式中, V , L 分别为特征速度(包括波浪水质点运动速度、结构运动速度和风速等)和特征线尺度;

(3) 雷诺数(Reynolds Number)相似: $\frac{L_m V_m}{\nu} = \frac{L_s V_s}{\nu}$, 保证模型和实体之间惯性力和黏性力的正确相似关系. 式中, ν 为流体(空气或水)的运动黏度. 由于风力机的空气动力载荷与空气黏性密切相关, 所以满足雷诺数相似可以保证几何相似的模型风力机叶片具有相同的空气动力学性能;

(4) 叶尖速比(Tip Speed Ratio, TSR)相似: $TSR_m = \frac{\Omega_m R_m}{V_{wm}} = \frac{\Omega_s R_s}{V_{ws}} = TSR_s$, Ω 为风轮旋转角速度,

V_w 为来流风速, R 为叶片半径. 满足TSR相似可以保证模型风轮旋转速度和由于转子不平衡所产生的系统激振频率以及塔筒和叶片空气动力学相互影响与实体相同;

(5) KC数(Keuligan-Carpenter Number)相似: $\frac{V_m T_m}{L_m} = \frac{V_s T_s}{L_s}$, 保证模型和实体之间阻力和惯性力的正确相似关系. 式中, T 为波浪周期. 在满足弗汝德数相似条件下, KC数也同时满足;

(6) 斯特劳哈尔数(Strouhal Number)相似: $\frac{f_m L_m}{V_m} = \frac{f_s L_s}{V_s}$, 保证模型和实体之间涡激运动响应的正确相似关系. 式中, f 为涡泄频率. 由于涡泄频率取决于雷诺数, 因此斯特劳哈尔数相似需首先满足雷诺数相似;

(7) 结构刚度相似: $\frac{E_s}{E_m} = \lambda$, E 为结构弹性模量, 结构刚度相似可以保证模型结构的固有频率和变形与实体相同.

实践证明, 在模型试验中模型和实体要达到完全相似是不可能的, 通常都是根据具体的试验研究对象, 选择合适的相似准则, 达到部分相似. 浮动风力机工作过程中受到风力机的运行载荷和波浪、海流等环境载荷的联合作用, 正确模拟重力、惯性力和风轮推力对于预报其耦合动力响应至关重要. 由于重力和惯性力对海上浮动结构物的运动起到支配作用, 因而首先选取弗汝德数相似条件. 然而在满足弗汝德数相似条件下, 不可能达到模型和实体两者的雷诺数相等. 在模型试验中, 由于模型和实体雷诺数不同而造成二者力学性能的差异, 称为“尺度效应”(Scale Effect). “尺度效应”在浮动风力机模型试验中主要影响风力机空气动力载荷、下浮体及筋腱的水动力载荷(黏性阻力)和下浮体的涡激运动响应.

由于模型风力机叶片的雷诺数将远小于实体风力机叶片的雷诺数, 因而几何相似的模型风力机叶片升、阻力性能将不同于实体叶片, 模型风力机风轮推力远低于弗汝德数相似条件要求的目标风轮推力. 本文采用基于风轮推力相似而优化设计的模型叶片用以保证模型风轮推力系数与实体相同, 即通过模拟等效的风力机空气动力载荷来解决风力机“尺度效应”问题^[6]. 风轮推力系数相似条件如下: $\frac{\frac{1}{2}\rho_{\text{airs}} C_{Ts} A_s V_{ws}^2}{M_s g} = \frac{\frac{1}{2}\rho_{\text{airm}} C_{Tm} A_m V_{wm}^2}{M_m g}$,

式中: ρ_{air} 为空气密度, C_T 为风轮推力系数, A 为风轮正投影面积, M 为结构质量.

对于小直径结构, 如下浮体立柱、浮箱和筋腱等所受到的黏性阻力由于模型和实体之间由于雷诺数不同而不同, 目前推荐做法是具体分析尺度作用并进行适当修正. 此外, 由于模型和实体之间的雷诺数不同而导致二者的斯特劳哈尔数不同, 即模型与实体间的涡泄频率不能满足相似条件, 从而下浮体的涡激运动响应不相似^[7]. 当涡泄频率与下浮体的运动固有频率相近时, 就会对结构产生不利的影响, 反之则影响较小. 为准确判断是否发生涡激运动现象及其严重程度, 通常需要在拖曳水池中单独开展涡激运动试验^[8].

根据所选取的相似法则, 模型与实体各种物理量之间的转换关系如表1所示.

3 试验设备及模型

试验在上海交通大学海洋深水试验池中进行, 水池长度50 m, 宽度40 m, 工作水深0–10 m, 可模拟各种海洋环境条件. 根据WindStar TLP System的主要尺度、环境条件, 以及实际设施条件, 模型缩尺比定为 $\lambda=50$. 设计水深为160 m, 对应水池试验水深为3.2 m. 试验中根据前述相似准则设计、制作了完整的Wind-

表1 模型与实体各种物理量之间的转换关系
Table 1 Scaling factors between model and reference

项目	符号	缩尺比	项目	符号	缩尺比
线尺度	L_s/L_m	λ	角速度	ϕ'_s/ϕ'_m	$\lambda^{-1/2}$
线速度	V_s/V_m	$\lambda^{1/2}$	周期	T_s/T_m	$\lambda^{1/2}$
线加速度	a_s/a_m	1	频率	f_s/f_m	$\lambda^{-1/2}$
角度	ϕ_s/ϕ_m	1	波浪力	F_s/F_m	$\gamma\lambda^3$
面积	A_s/A_m	λ^2	波浪力矩	M_s/M_m	$\gamma\lambda^4$
体积	∇_s/∇_m	λ^3	风力	F_s/F_m	λ^3
水的密度	ρ_s/ρ_m	γ	风力矩	M_s/M_m	λ^4
质量(排水量)	Δ_s/Δ_m	$\gamma\lambda^3$	弹性模量	E_s/E_m	λ
下浮体转动惯量	J_s/J_m	$\gamma\lambda^5$	扭矩	T_s/T_m	λ^4
截面惯性矩	I_s/I_m	λ^4	功率	P_s/P_m	$\lambda^{7/2}$

Star TLP System 1/50th模型, 如图2所示, 具体包括以下部分:

(1) 1套5 MW风力机风轮系统1/50th模型, 包括机舱、桨毂结构、桨距调节装置、风轮驱动装置、叶片、主轴和联轴器等;

(2) 1根塔筒模型, 1座多立柱张力腿式支撑平台模型和1套张力腿式系泊系统模型(6根筋腱).

试验中使用的测试仪器如下:

(1) 六分量力传感器: 布置在塔筒顶端, 用于测量塔筒顶端处6个方向的受力;

(2) 六分量加速度传感器: 布置在机舱和支撑平台上, 用于测量机舱和平台处6个方向的加速度;

(3) 扭矩传感器: 布置在机舱内, 与风轮主轴相连, 用于测量主轴扭矩;

(4) 单分量力传感器: 布置在系泊系统顶端, 用于测量张力腿筋腱的顶端张力;

(5) 非接触式的光学6个自由度的测量仪器: 利用位置测量仪测量固定在模型上的3个发光元件的运动, 通过计算得到平台重心处6个自由度的运动;

(6) 叶轮式流速仪: 测量平均流速;

(7) 热敏风速仪: 测量平均风速;

(8) 电阻式浪高仪: 安装在拖车上和模型上, 用于波浪实时测量;

(9) 1台摄像机: 用于模型试验过程的摄像;

(10) 1套数据自动采集及实时分析系统.

3.1 坐标系

模型试验中采用的大地坐标系 $O-xyz$ 和随体坐标系 $G-x'y'z'$ 定义如图3(a)所示, 浮动风力机随体坐标系6自由度运动方向定义如图3(b)所示, 坐标系原点设在系统重心 G 处.

3.2 风力机模型

风轮系统采用美国国家可再生能源实验室发布的海上5 MW风力机^[5]. 试验中为了满足严格的重力相似条件, 模型采用了轻质材料加工、制作(叶片采用碳纤维材料, 机舱、桨毂、塔筒和主轴等均采用铝合金材料). 采用伺服电机-齿轮箱系统主动驱动风轮以控制风轮转速, 使得风轮系统满足TSR相似. 采用了低雷诺数翼型(NACA4412), 并根据推力相似要求, 以重量最轻为优化目标, 优化设计了模型叶片, 从而有效地解决了浮式风力机模型试验中的空气动力载荷的“尺度效应”问题^[6]. 表2为该风力机实体及模型的主要性能参数. 图4为WindStar TLP System模型风轮系统示意图. 图5给出了WindStar TLP System模型风轮推力随风速变化曲线, 并与实体风轮推力(满足弗汝德数相似)进行了比较, 二者吻合良好.

3.3 支撑平台及张力腿模型

WindStar TLP支撑平台模型根据设计方案所确定

图2 (网络版彩图) WindStar TLP System 1/50th模型图
Figure 2 (Color online) 1/50th scale model of the WindStar TLP System.

图3 (网络版彩图) (a) 大地坐标系和随体坐标系系统; (b) 随体坐标系运动方向定义
Figure 3 (Color online) (a) Global and body coordinate system; (b) WindStar TLP System motion definition.

表2 NREL 5 MW风力机实体及模型主要参数
Table 2 Reference and model properties for the NREL-5 MW wind turbine

项目	实际值	模型值	单位
风轮直径	126.0	2.52	m
额定风速	11.4	1.612	m/s
额定风轮转速	12.1	85.56	r/min
风轮质量	110000	0.880	kg
机舱质量	240000	1.920	kg
塔筒长度	65.6	1.312	m
塔筒质量	265000	2.120	kg
塔筒重心高度	27.0	0.54	m
塔筒一阶纵向固有频率	0.5	3.536	Hz
塔筒一阶横向固有频率	0.492	3.48	Hz

图4 (网络版彩图) WindStar TLP System模型风轮系统
Figure 4 (Color online) Model rotor of the WindStar TLP System.

的外形图进行加工制作, 模型材料选用玻璃钢, 并在与塔筒模型相连接处预埋铝合金法兰. 模型外形尺寸误差不超过1 mm. 表3给出了WindStar TLP支撑平台在工作载况下的主要参数. 张力腿筋腱采用弹簧和钢丝绳组合进行模拟.

4 试验工况与环境条件

4.1 试验工况

本文采用IEC 61400-1(International Electrotechni-

cal Committee. IEC 61400-1: Wind turbines part 1: Design requirements. International Electrotechnical Commission; 2005)和IEC 61400-3(International Electrotechnical Commission. IEC 61400-3. Wind Turbines—Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines, 2009)设计标准作为计算指导, 标准中规定陆上和海上风力机设计计算时需采用预定安装位置处的环境条件.

图5 (网络版彩图) WindStar TLP System模型风轮推力曲线
Figure 5 (Color online) Model rotor thrust curve of the WindStar TLP System.

表3 WindStar TLP支撑平台实体与模型(工作载况)主要参数
Table 3 Reference and model properties for the WindStar TLP under working conditions

项目	实际值	模型值	单位
中央立柱直径	4.5	0.09	m
周向立柱截面尺寸	5.4×4.2	0.108×0.084	m
型深	51.3	1.026	m
设计吃水	30.0	0.6	m
空船重量(含压载)	2445000	19.56	kg
空船重量重心位置(距基线高度)	20.3	0.407	m
横摇/纵摇转动半径(包含压载)	21.61	0.432	m
首摇转动半径(包含压载)	21.05	0.421	m
张力腿长度	128.0	2.56	m
导缆孔距中心半径	40.7	0.814	m
张力腿筋腱刚度	298.8	0.119	t/m
张力腿总预张力	2351000	18.81	kg
排水量	5460.0	42.615	kg

WindStar TLP浮动风力机预定安装位置位于北纬61°20'和东经0°0', 靠近苏格兰北部的设得兰群岛, 平均水深约为160 m. 该处共有约13年总计37992个不间断3 h风、浪统计资料样本^[9]. 试验分类及工况汇总见表4, 对应的环境条件见表5. 风浪流综合试验包括了低海况下的风力机工作工况和极限海况下的风力机停机工况. 在高于额定风速时, 风力机叶片转角通过手动调整方式设定.

4.2 环境条件模拟

风的模拟为定常风模拟. 采用了3×3阵列式轴流风机造风系统, 安装在拖车底部, 造风装置前端采用蜂窝板进行整流, 如图4所示. 采用造流系统对表层流速进行模拟. 水池中的不规则波选用双参数JONSWAP谱、有义波高和谱峰周期进行模拟. 波浪模拟中, 摇板信号需要同步采样, 采样频率40 Hz, 采样时间>23.3 min (对应实际3 h), 采样点数不少于56000点. 从下达造波指令开始, 到采样记录开始, 需间隔1.5 min, 以使正式试

验采样时模型能够处于基本稳定的运动状态. 图6比较了水池模拟的50年一遇极限工况JONSWAP波浪测量谱与理论目标波浪谱, 从图中可以看出, 水池模拟的不规则波浪具有较高的精度.

5 试验结果与分析

5.1 静水试验

静水试验包括了张力腿式系泊系统水平刚度校验和6自由度衰减试验. 通过给模型施加一个足够的初始纵荡位移, 并对纵荡回复力和张力腿平台下沉量(Set-Down)进行测试, 得到了纵荡回复力-位移曲线(图7)和平台下沉量-位移曲线(图8). 其中, 纵荡回复力-位移曲线呈现出线性趋势, 而平台下沉量-位移曲线则表现出较强的非线性特性, 计算值与测量值吻合良好.

6自由度衰减试验在静水中进行, 通过对模型在纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇和艏摇6个方向上施

表 4 试验分类及工况汇总
Table 4 Summary of model test types and load cases

试验分类	试验工况	测试内容
静水试验	水平刚度校验工况	张力腿水平刚度
	6自由度衰减工况	固有周期和阻尼
白噪声波浪试验	白噪声波浪工况	RAO和低频、高频响应特性
	风力机工作工况1 (DLC01)	低于额定风速下的动力响应
	风力机工作工况2 (DLC02)	额定风速下的动力响应
	风力机工作工况3 (DLC03)	高于额定风速下的动力响应
风浪流综合试验	风力机工作工况4 (DLC04)	高于额定风速下的动力响应
	风力机工作工况5 (DLC05)	切出风速下的动力响应
	1年一遇极限工况 (DLC06)	1年一遇极限工况下的动力响应
	50年一遇极限工况(DLC07)	50年一遇极限工况下的动力响应

表 5 环境条件
Table 5 Environmental conditions

工况	平均风速 (m/s)		有义波高 (m)		谱峰周期 (s)		谱峰因子		表层流速 (m/s)	
	实型	模型	实型	模型	实型	模型	实型	模型	实型	模型
白噪声波浪工况	0.0	0.0	~2.0	~0.04	5~25	0.707~3.54	0.0	0.0	0.0	0.0
风力机工作工况1	7.0	0.99	1.9	0.038	12.7	1.796	1.0	1.0	0.6	0.085
风力机工作工况2	11.4	1.612	2.4	0.048	13.4	1.895	1.0	1.0	0.6	0.085
风力机工作工况3	15.4	2.178	3.4	0.068	13.4	1.895	1.0	1.0	0.6	0.085
风力机工作工况4	19.6	2.772	4.4	0.088	14.1	1.994	1.0	1.0	0.6	0.085
风力机工作工况5	23.8	3.366	5.5	0.11	15.5	2.192	1.0	1.0	0.6	0.085
1年一遇极限工况	37.0	5.233	10.8	0.216	17.6	2.489	2.0	2.0	1.2	0.17
50年一遇极限工况	42.5	6.01	13.8	0.276	19.1	2.701	2.4	2.4	2.0	0.283

图6 (网络版彩图) JONSWAP波浪测量谱与目标谱的比较
Figure 6 (Color online) Comparisons between the target and measured JONSWAP wave spectrum.

图7 (网络版彩图)不同纵荡位移下回复力计算值与测量值比较
Figure 7 (Color online) Comparisons between the calculated and measured restoring loads with different surge displacements.

加一个初始位移, 测量得到了相应方向上的静水衰减曲线. 假定运动幅值符合指数形式衰减, 则可求得相应运动方向上的线性阻尼比和固有周期(见表6). 由静水衰减试验结果可知, WindStar TLP System在纵荡、横荡和艏摇方向上具有较大的固有周期, 在垂荡、横摇和纵摇方向上具有较小的固有周期, 均避开了通常海洋环境中的波浪周期范围, 从而在波浪中具有良好的运动性能.

5.2 白噪声波浪试验

在频率 $0.2 \leq \omega \leq 1.5$ rad/s的范围内模拟了白噪声波

图8 (网络版彩图)不同纵荡位移下平台下沉量计算值与测量值比较
Figure 8 (Color online) Comparisons between the calculated and measured platform set-down with different surge displacements.

表6 静水衰减试验结果

Table 6 Still water decay test results

运动	固有周期 T^d (s)	线性阻尼比 ζ
纵荡	45.31	0.0498
横荡	45.31	0.0482
垂荡	3.78	0.0175
横摇	5.33	0.0158
纵摇	5.33	0.0161
艏摇	25.21	0.0448

浪谱, 测量中的有义波高为0.04 m, 对应实际波高2.0 m, 浪向为 0° . 白噪声波浪谱的形式如下:

$$S(\omega) = S_0, \quad 0.2 \leq \omega \leq 1.5 \text{ rad/s}.$$

图9给出了水池模拟的白噪声波浪测量谱与理论目标波浪谱, 从图中可以看出, 水池模拟的白噪声波浪与目标波浪吻合较好.

通过白噪声波浪试验, 分析得到了WindStar TLP System的运动幅值响应算子(RAO). 图10–12给出了 0° 浪向下纵荡、垂荡和纵摇RAO试验结果, 其中纵荡运动显示出了显著的低频效应, 而垂荡和纵摇运动则体现出了高频和波频特性.

5.3 风浪流综合试验

本试验中采用的不规则波谱均为JONSWAP谱, 风、浪、流同向. 模拟的海况包括了风力机工作工况(DLC01-05)和停机工况(DLC06, DLC07). 为进一步考

图9 (网络版彩图)白噪声波浪测量谱与目标谱的比较
Figure 9 (Color online) Comparisons between the target and measured white noise wave spectrum.

图10 (网络版彩图)纵荡运动幅值响应算子
Figure 10 (Color online) RAO results of surge motion.

察不同载荷对WindStar TLP System动力响应的影响, 每种工况下又分为风载荷单独作用、波浪载荷单独作用、流载荷单独作用和风、浪、流载荷联合作用4个子工况。

图13和14给出了各工况下纵荡和纵摇运动的统计值(箱型图中矩形箱子的高度为正/负两倍的标准差, 即响应的有义值, 下同)。从图中可以清楚地看出, 在风力机工作工况下, 纵荡和纵摇运动主要由风力机风轮推力引起, 且最大运动响应出现在风力机额定工况下(该工况下风轮推力值最大); 在风力机停机工况下,

图11 (网络版彩图)垂荡运动幅值响应算子
Figure 11 (Color online) RAO results of heave motion.

图12 (网络版彩图)纵摇运动幅值响应算子
Figure 12 (Color online) RAO results of pitch motion.

随着波高和流速的增加, 波浪载荷和流载荷对纵荡和纵摇运动起支配作用, 其中运动响应的均值由风载荷和流载荷决定, 波动则由波浪载荷控制。在50年一遇极限工况下(DLC07), 纵荡和纵摇运动的响应极值分别为27.2 m和1.62°。值得引起注意的是, 在风、浪、流载荷联合作用工况下, 纵荡和纵摇运动的波动小于波浪载荷单独作用工况, 即风载荷和流载荷的存在对运动起到了一定程度的稳定作用, 增加了纵荡和纵摇运动的阻尼。

图15为各工况下迎风向张力腿筋腱张力统计值(筋腱编号1)。张力腿筋腱张力与纵摇、纵荡运动密切相关, 因此显示出了与纵摇和纵荡运动相同的变化趋势。迎风向张力腿筋腱最大张力值为6156 kN (包含预

图 13 (网络版彩图)纵荡运动统计值
Figure 13 (Color online) Statistics of surge motion.

图 16 (网络版彩图)风力机机舱纵荡方向加速度统计值
Figure 16 (Color online) Statistics of nacelle surge acceleration.

图 14 (网络版彩图)纵摇运动统计值
Figure 14 (Color online) Statistics of pitch motion.

图 15 (网络版彩图)迎风向张力腿筋腱张力统计值
Figure 15 (Color online) Statistics of upwind tendon tension.

张力), 相应最小安全系数为2.39, 筋腱最小张力值在各工况下均为正值, 因而满足设计要求。

图16为各工况下风力机机舱纵荡加速度统计值。

与固定式风力机不同, 浮式风力机机舱纵荡加速度不仅包含了塔筒前后摆动引起的水平加速度, 还包括了浮式平台纵荡加速度和纵摇引起的水平加速度, 因而通常远高于固定式风力机^[10]。在风载荷单独作用工况下, 机舱加速度在风力机额定工况下取得最大值(1.31 m/s^2); 在波浪单独作用工况下, 机舱加速度随着波高的增加而不断增大, 在50年一遇极限工况下取得最大值(3.95 m/s^2); 流载荷对机舱加速度几乎没有影响; 在风、浪、流载荷联合作用下, 机舱加速度最大值约为 3.2 m/s^2 , 小于波浪载荷单独作用工况。综上可知, 波浪载荷是引起浮式风力机机舱加速度的控制载荷。

6 结论

本文通过选取合适的相似准则并建立一套风力机模型, 对所提出的新型多立柱张力腿式浮动风力机概念开展了完整的水池模型试验研究, 得到了不同环境条件下的动力响应, 从试验结果可以看出:

(1) 采用基于风轮推力相似而优化设计的模型叶片可以有效解决浮式风力机模型试验中的“尺度效应”问题;

(2) 模型试验测得的WindStar TLP System水平刚度曲线和下沉量-偏移曲线与理论计算值吻合较好, 表明张力腿筋腱模拟方法可行;

(3) 在风浪流综合试验中, 风载荷和流载荷的存在对纵荡和纵摇运动起到了一定程度的稳定作用, 增加了纵荡和纵摇运动的阻尼;

(4) 迎风向张力腿筋腱在50年一遇极限工况下的最小安全系数为2.39, 且筋腱最小张力值在各工况下

均为正值, 因而满足设计要求;

(5) 总体而言, 由于WindStar TLP System 的6自由

度固有周期均远离通常海洋环境中的波浪周期范围,

因此在波浪中显示了良好的运动性能.

参考文献

- 1 Kimball R, Goupee A J, Fowler M J, et al. Wind/wave basin verification of a performance-matched scale-model wind turbine on a floating offshore wind turbine platform. In: Proceedings of 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. San Francisco: American Society of Mechanical Engineers, 2014
- 2 Martin H R, Kimball R W, Viselli A M, et al. Methodology for wind/wave basin testing of floating offshore wind turbines. *J Offshore Mech Arct Eng*, 2014, 136: 021902
- 3 Robertson A N, Jonkman J M, Goupee A J, et al. Summary of conclusions and recommendations drawn from the DeepCwind scaled floating offshore wind system test campaign. In: Proceedings of 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Nantes: American Society of Mechanical Engineers, 2013
- 4 Zhao Y, Yang J, He Y. Preliminary design of a multi-column TLP foundation for a 5-MW offshore wind turbine. *Energies*, 2012, 5: 3874–3891
- 5 Jonkman J M, Butterfield S, Musial W S, Scott G. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. Technical Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2009. NREL/TP-500-38060
- 6 Du W, Zhao Y, He Y, et al. Design, analysis and test of a model turbine blade for a wave basin test of floating wind turbines. *Renewable Energy*, 2016, 97: 414–421
- 7 Yang J M, Xiao L F, Sheng Z B. Ocean Engineering Hydrodynamics Experimental Research (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2008 [杨建民, 肖龙飞, 盛振邦. 海洋工程水动力学试验研究. 上海: 上海交通大学出版社, 2008]
- 8 Zhou Y, Huang W. Study on the similarity relation of model test of vortex-induced vibration on circular cylinders. *Inter J Fluid Dyn*, 2014, 02: 35–45
- 9 Jonkman J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine. Technical Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2007. NREL/TP-500-41958
- 10 Zhao Y, Yang J, He Y, et al. Dynamic response analysis of a multi-column tension-leg-type floating wind turbine under combined wind and wave loading. *J Shanghai Jiaotong Univ (Sci)*, 2016, 21: 103–111

Experimental study of a new multi-column tension leg-type floating wind turbine concept

ZHAO YongSheng, YANG JianMin, HE YanPing*, PENG Tao & KOU YuFeng

*State Key Laboratory of Ocean Engineering, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration,
School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*

Offshore deep-water region is rich in high-quality wind energy. Currently offshore floating wind turbine is the most potential equipment to exploit it. The relevant scaling laws need to be considered during the offshore floating wind turbine model test were analysed and a proper scaling methodology was established according to the loading conditions. The wave tank model test was conducted for the proposed new multi-column tension leg-type floating wind turbine concept in SKLOE's wave basin with the geometric scaling factor of 50 according to the main dimensions and environmental conditions. By using a modified blade design based on the same wind turbine thrust coefficient, the aerodynamic Reynolds number scaling effect was dissimilated during the model test. Still water tests, white noise wave tests and combined wind wave and current tests were carried out. During the combined wind, wave and current tests, both the turbine operating (DLC01-05) and parked conditions (DLC06, DLC07) were investigated. To identify the dominate load of the dynamic responses, each design load case was further separated into four different sub-load cases: wind only case, wave only case, current only case and combined load case. Global response variables including platform motion, tendon tension, rotor thrust, and nacelle accelerations were examined. In summary, the proposed WindStar TLP system showed relatively small dynamic motion responses to environmental loads due to its natural frequencies are well kept away from the dominant wave periods and the tendons still holds a sufficient safety factor, and the minimum tendon tensions remain positive under all the selected DLCs. The model testing results could serve as a reference for the further research.

floating wind turbine, model test, scale effects, WindStar TLP, motion response

PACS: 89.30.Ee, 47.35.+i, 47.85.Dh, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA2016-00291](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00291)