

# 新型浮式风能-波浪能集成结构系统耦合动力分析

任年鑫<sup>1,3</sup>, 朱莹<sup>1</sup>, 马哲<sup>1,2</sup>, 周孟然<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学深海工程研究中心, 大连 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;  
3. 北京交通大学结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:** 针对中国丰富深水风能和波浪能资源开发的未来需求,提出一种张力腿式风力机与垂荡式波浪能装置相集成的新型浮式结构系统。首先,选取 NREL 5 MW 风力机模型,基于叶素动量理论(blade element momentum, BEM)方法研究该集成系统风力机叶片的气动性能,基于势流理论方法模拟分析垂荡式波浪能装置与张力腿平台结构的水动力载荷,并考虑波浪能装置等效 PTO(power take-off)系统的多体动力耦合效应,建立新型张力腿式风力机-垂荡式波浪能装置集成结构系统的空气动力与水动力耦合时域分析模型;其次,对比总结不同波浪能装置(PTO)设计参数对集成平台波浪能输出功率的影响规律;最后,重点研究典型最大运行发电海况下该新型浮式集成结构系统的结构动力响应特征及风能-波浪能输出功率特征,并验证其在极端海况下的安全性能。

**关键词:** 海上风力机; 波浪能转化; 动力分析; 多体效应; 新型浮式

**中图分类号:** TK8

**文献标志码:** A

## 0 引 言

海风与海浪具有天然的相关性,风能丰富水域的波浪能资源也非常可观。如果将海上风力机与波浪能发电装置进行科学集成,使二者共享支撑平台结构和配套电力传输系统,不仅可提高海洋可再生能源的利用效率,而且可有效降低单位发电成本。

目前,世界范围内有关浮式风力机-波浪能装置集成平台系统的研究还处于起步探索阶段,相关研究成果较为有限。最具代表性和影响力的是欧盟所资助的 MARINA (marine renewable integrated application platform) 研究计划,其涉及多种风能-波浪能集成平台结构系统的概念设计。Aubault 等<sup>[1]</sup>和 Peiffer 等<sup>[2]</sup>基于 WindFloat 半潜式风力机平台分别提出一种与振荡水柱式波浪能发电装置及与单点波浪能吸收装置相结合的浮式集成结构系统,分别利用简化等效数值模拟方法和物理模型水动力试验手段,重点研究了 2 种新型集成结构系统的动力响应特征。Michailides 等<sup>[3-4]</sup>分别采用数值模拟和 1:50 风浪联合试验的方法,较为系统地研究了一种半潜式浮式风力机与摇摆式波浪能装置集成结

构系统在典型运行和极端海况下的动力响应特征。Muliawan 等<sup>[5-6]</sup>提出一种 Spar 式风力机与垂荡式波浪能发电装置相集成的浮式结构系统(spar-torus combination, STC),并利用 SIMO-TDHMILL 时域分析程序获得了该新型浮式结构系统在典型运行海况和极端设计海况下的动力响应特征。文献[7-8]通过简化缩尺模型试验的方法,重点研究及验证 STC 浮式结构系统在典型海况下的动力响应特征。任年鑫等<sup>[9]</sup>进一步对 STC 浮式集成构系统进行全寿命耦合时域模拟分析,指出大型附加波浪能发电装置及不同自存策略对平台锚缆与塔架结构的长期疲劳损伤和极值响应应具有重要影响。Bachynski 等<sup>[10]</sup>提出一种张力腿式平台与 3 个小型摆动式波浪能发电装置相结合的浮式集成结构系统,用 SIMO-RIFLEX-AeroDyn 耦合时域分析程序获得其动力响应和风能/波浪能输出功率的特征信息。

本文拟创新性提出一种新型张力腿式平台(tension leg platform, TLP)式风力机-垂荡式波浪能发电装置集成结构系统,并建立该新型集成结构系统的空气动力与水动力耦合时域分析模型;重点研究典型海况下该新型浮式集成结构系统的动力响应特征及风能-波浪

收稿日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(51709040; 51761135011; 51651902); 中央高校基本科研业务费专项资金

通信作者: 任年鑫(1983—), 男, 博士、讲师, 主要从事海上风力发电、波浪能装置方面的研究。rennianxin@dlut.edu.cn

能输出功率特征,并校核其在极端海况下的安全性能。

## 1 理论基础及数值模型

### 1.1 新型风能波浪能集成结构系统概述

目前,基于 Spar 平台的风能-波浪能集成结构系统的吃水较深(整体建造成本较高),且在极端海况下有可能出现垂向共振效应<sup>[7]</sup>,而基于半潜式平台的风能-波浪能集成结构系统中的波浪能发电功率一般较小,因此,本文拟概念性提出一种基于更高性价比的张力腿式平台(TLP)<sup>[11]</sup>的风力机-波浪能装置集成结构系统,如图 1 所示。

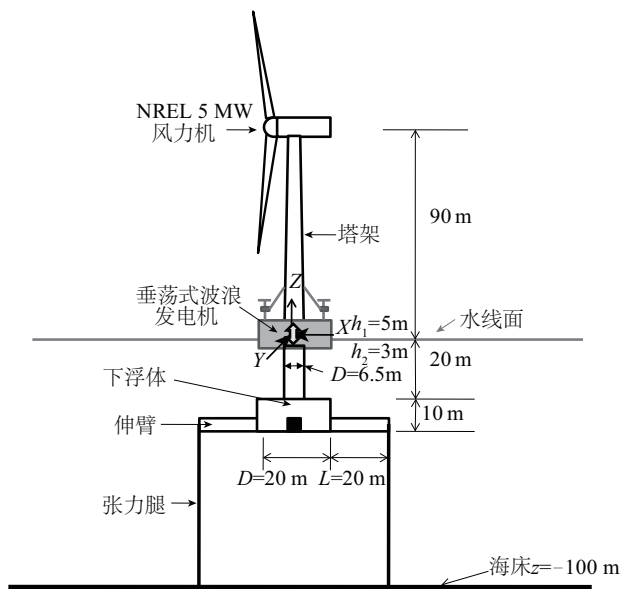


图1 新型张力腿式风力机与垂荡式波浪能装置集成结构系统示意图

Fig. 1 Conceptual sketch of novel TLP wind turbine and wavebob combined structural system

本文所提新型集成结构系统包括:

1)一种适合 NREL 5 MW 风力机的张力腿式平台结构<sup>[12]</sup>,该张力腿平台的可行性及主要动力响应特征已从数值模拟和物理模型试验的角度得到了较好的验证<sup>[13]</sup>。

2)垂荡式波浪能装置<sup>[5]</sup>具有轴对称特征,主要由外部圆环浮筒和内部中心浮筒构成;其主要利用内外 2 个浮筒的垂向相对运动来驱动液压传动(hydraulic power take-off PTO)系统进行波浪能的获取。

如果利用张力腿风力机平台的塔架支撑结构代替垂荡式波浪能装置的内部浮筒结构,对二者进行系统集成,不仅可有效提高海洋可再生能源和宝贵海面资源

综合利用效率,而且还可有效节省原波浪能装置内部浮筒、配套锚泊系统和电力传输系统的造价,即降低发电成本。

新型张力腿式风能-波浪能集成结构系统的主要设计参数如表 1 所示。需要指出的是该新型浮式集成结构系统仍处在初步设计阶段,本文主要是验证该新型浮式集成结构系统的动力响应特征和风能-波浪能输出功率特征,尚未涉及该新型集成结构系统的优化设计。鉴于不同海域地区的水深及风浪环境特征存在较大差异,相关张力腿式风力机-波浪能集成结构系统的最优设计参数也会有所不同,因此有关新型集成结构系统的优化设计问题将在未来的研究工作中展开。

表1 新型张力腿式风能-波浪能集成结构主要设计参数

Table 1 Main structure design parameters for new TLP wind energy -wave energy combined structure

装置	参数	数值
NREL 5 MW 风力机	轮毂、机舱、塔架质量/t	110、240、347
	水下塔架高度及直径/m	20、6.5
	水下浮筒直径及高度/m	20、10
TLP	浮筒扩展伸臂尺寸/m	4×4×20
	设计水深/m	100
	平台总质量,平台总排水/t	2840、5240
波浪能装置	平台整体结构质心位置/m	(0,0,-1)
	转动惯量 $I_{xx}$ 、 $I_{yy}$ 、 $I_{zz}$ /kg·m <sup>2</sup>	$4.5\times10^9$ 、 $4.5\times10^9$ 、 $3.1\times10^8$
	张力腿直径、壁厚、长度/m	1.20、0.04、70.00
波浪能装置	张力腿弹性模量及根数/N·m <sup>-2</sup>	$2.1\times10^{11}$ 、4.0
	浮筒外径与内径/m	20、8
	吃水深度与总高度/m	3、8
波浪能装置	总排水量=总质量/t	791
	重心位置/m	(0,0,-1)

### 1.2 波浪能装置与张力腿平台动力耦合效应建模

张力腿平台与垂荡式波浪能装置动力耦合效应主要包含以下 2 个方面(见图 2):1)波浪能装置与张力腿塔架结构之间的滑轮-滑道接触装置模拟垂荡式波浪能装置可利用对称分布的,即 2 排×4 个滑轮-轨道接触装置沿塔架结构进行相对垂向运动,并保证二者在除垂荡的其他 5 个自由度方向上实现协调运动。每个滑轮与滑道间接触力的模拟是通过设置水平方向等效弹簧和阻尼器实现的。初步设计弹簧刚度  $k_{sw}=500$  kN/m 和

阻尼刚度  $k_{pw} = 500 \text{ kNs/m}$ 。2) 波浪能 PTO 液压发电系统模拟。鉴于本文是初步设计, 将波浪能装置 PTO 液压发电系统的垂向动力耦合效应简化等效为线性弹簧刚度 ( $k_{pto} = 10 \text{ kN/m}$ ) 和线性阻尼刚度 ( $B_{pto}$ ) 模型。因此, 波浪能装置的输出功率  $P_{wave}(t)$  可通过 PTO 系统的耦合阻尼力  $F_{Bpto}(t)$  和相对垂荡速度  $V_{ref}$  推算获得:

$$P_{wave}(t) = F_{Bpto}(t) \cdot V_{ref} = F_{Bpto}^2(t) / B_{pto} \quad (1)$$

新型浮式集成结构系统可等效简化为波浪能装置与张力腿平台的双刚体耦合动力系统:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^{wave}(t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{11}^{wave}(t) & F_{12}^{wave}(t) \\ F_{21}^{wave}(t) & F_{22}^{wave}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1^{coupling}(t) \\ F_2^{coupling}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1^{tether}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $M$  ——质量矩阵;  $x$  ——位移矩阵;  $F_{wind}$  ——风载荷矩阵;  $F_{wave}$  ——波浪载荷矩阵;  $F_{coupling}$  ——滑轮轨道与 PTO 耦合载荷矩阵;  $F_{tether}$  ——张力腿受力矩阵; 下标 1、2 分别表示张力腿平台和波浪能装置。

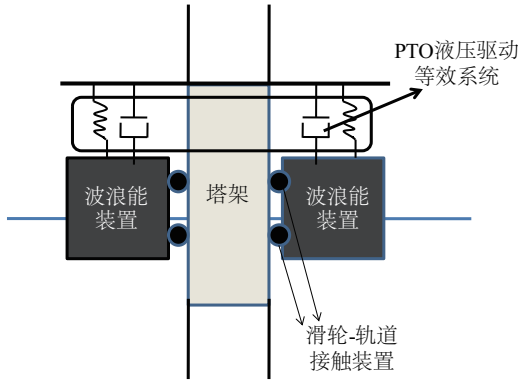


图2 垂荡式波浪能发电装置与塔架动力耦合简化模型

Fig. 2 Simplified dynamic coupling model between WEC and tower

### 1.3 空气动力载荷分析

鉴于商用海上风力机设计数据的保密性限制, 本文选取美国可再生能源实验室(NREL)5 MW 海上风力机叶片性能(风速-水平推力曲线和风速-输出功率曲线)的公开设计参数<sup>[14]</sup>, 考虑浮式平台运动对风力机入射风速的影响, 利用 AeroDyn 程序<sup>[15]</sup>模拟风力机叶片的气动性能。

此外, 作用在风力机塔架上的空气动力载荷  $F_{tower}(t)$  可简化计算为:

$$F_{tower}(t) = \frac{1}{2} \rho_a C_D A U_{ref}^2(t) \quad (3)$$

式中,  $\rho_a$  ——空气密度;  $C_D$  ——风阻系数;  $A$  ——塔架等效投影面积;  $U_{ref}$  ——相对入射风速。

### 1.4 水动力载荷分析

基于势流理论, 利用 AQWA 程序<sup>[16]</sup>耦合求解作用于波浪能装置与张力腿平台的水动力载荷。广泛应用于浮体水动力分析的 AQWA 程序可有效地处理张力腿系泊结构、2 阶波浪力载荷及定义多体间的弹簧-阻尼动力耦合效应, 并提供 user-force 接口模块进行复杂外部叶片风载荷的交互式输入, 非常适合该新型浮式集成结构系统的模拟分析。该新型浮式集成结构系统的水动力数值模型如图 3 所示。

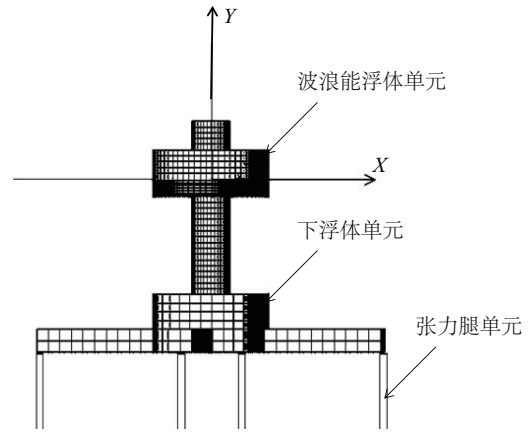


图3 新型浮式集成结构系统水动力数值模型

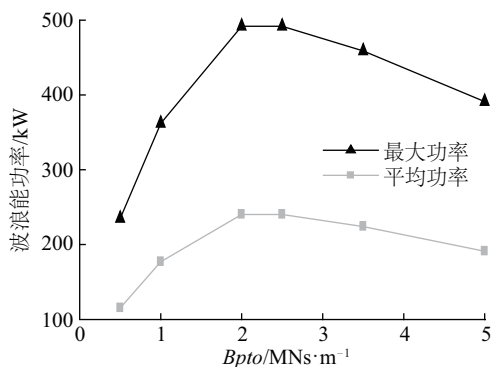
Fig. 3 Numerical model of new floating combined system

## 2 主要模拟结果分析

基于已构建的新型张力腿式风力机-垂荡式波浪能装置集成结构系统的风浪耦合时域分析模型, 重点研究不同  $B_{pto}$  参数、典型最大运行海况和极端海况下该新型浮式集成系统的主要动力响应特征。

### 2.1 不同 $B_{pto}$ 参数对波浪能装置输出功率的影响

鉴于波浪能装置 PTO 系统的等效阻尼刚度系数 ( $B_{pto}$ ) 会显著影响浮式集成结构系统在同等海况下的波浪能输出功率性能<sup>[2]</sup>, 因此选取典型波浪海况(波高  $H = 2 \text{ m}$ , 波浪周期  $T = 9 \text{ s}$ ), 重点研究不同  $B_{pto}$  参数对波浪能输出功率的影响规律, 数值结果如图 4 所示。从图 4 可看出波浪能的平均输出功率和最大输出功率随  $B_{pto}$  值的增加先增大后减小, 在  $B_{pto} = 2 \text{ MNs/m}$  附近达到最大值, 因此可以初步优化设计该集成结构系统的  $B_{pto}$  值为  $2 \text{ MNs/m}$ 。

图4 不同  $B_{pto}$  参数对波浪能装置性能的影响Fig. 4 Effect of different  $B_{pto}$  coefficients on WEC

此外,进一步研究不同波浪周期对浮式集成结构系统波浪能输出功率的影响规律,主要数值模拟结果如图5所示。从图5可看出该集成结构系统波浪能装置的输出功率随波浪周期的增加先增大后减小,即在波浪周期9 s附近达到最大值。需要指出的是,波浪能装置的外径、吃水深度和  $B_{pto}$  值都会显著影响该集成结构系统的最优发电波浪周期( $T=9$  s),如进一步结合实际海域波浪周期分布特征调整该集成结构系统的最优发电波浪周期,可以通过调整波浪能装置的外径、吃水深度和  $B_{pto}$  值实现。

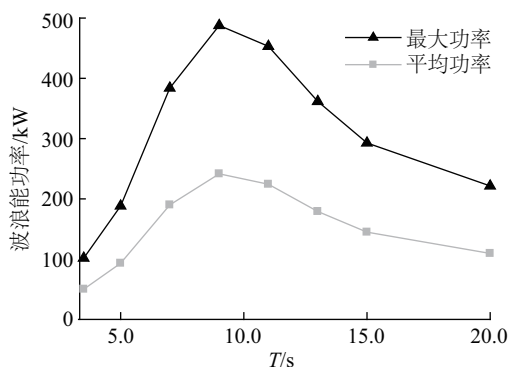


图5 不同波浪周期对波浪能装置性能的影响

Fig. 5 Effect of different wave periods on WEC

## 2.2 典型最大发电运行海况风浪联合模拟

假定海风与波浪作用在同一直线上(即最不利载荷情况),重点研究该新型集成结构系统在典型最大风浪运行发电海况下的动力响应特征及风能-波浪能输出功率特征。选取5 MW 风力机最大运行风速24 m/s时的典型海况条件(波高  $H=6$  m,波浪周期  $T=9$  s),对该新型浮式集成结构系统进行风浪耦合时域模拟,并将数值模拟结果与对应无附加波浪能装置的纯张

力腿式风力机结构的模拟结果进行对比分析,结果如图6所示。

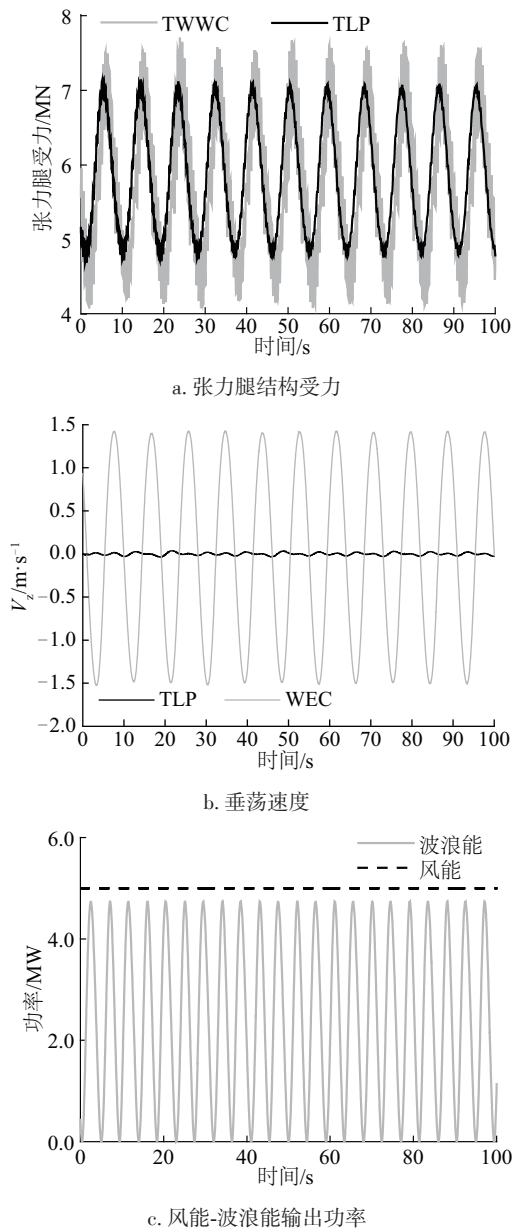


图6 最大运行海况下集成结构系统与纯张力腿风力机主要数值结果对比时程

Fig. 6 Comparison of main numerical results between TWWC and TLP system under maximum sea case

从图6a可看出,由于附加波浪能装置与张力腿平台的垂向(PTO系统)动力耦合作用,新型集成结构系统(TWWC)张力腿的动力响应幅值略大于纯张力腿(TLP)风力机结构,前者约为后者的1.1倍,即附加波浪能装置并未显著增加张力腿结构的载荷负担;图6b为波浪能装置(WEC)与张力腿平台(TLP)垂向速度



( $V_z$ )的时程对比,二者的相对垂向运动速度时程是评估垂荡式波浪能装置发电率性能的重要参考依据。此外,图6c进一步给出了波浪能输出功率和风能输出功率的时程对比,从图6c可以看出,此海况( $H=6\text{ m}$ ,  $T=9\text{ s}$ )下的波浪能输出功率幅值(4.8 MW)与NREL 5 MW风力机的额定功率非常接近,因此该集成结构系统的波浪能预计发电量也将非常可观。但综合考虑到波浪能平均输出功率约为其功率幅值的一半、波浪能装置能量转化效率较低及不同海域波浪统计特征差异较大等因素,上部风力机的风能发电贡献将在该集成结构系统总发电量中占主导地位。

### 2.3 极端海况风浪联合模拟

为验证该新型浮式集成结构系统在极端海况下的安全性,选取中国东南某海域50年一遇的代表性极端海况,各参数如表2所示。

表2 代表性极端海况

Table 2 Representative extreme sea condition

风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	有义波高 $H_s/\text{m}$	谱峰周期 $T_p/\text{s}$	JOHNSWAP 谱 $\lambda$
30	9	11.3	3.3

假定海风与入射波浪作用在同一直线上。鉴于极端海况下波高较大,为保证波浪能装置PTO系统的安全性,波浪能装置将处于停机状态(有义波高 $H_s>6\text{ m}$ 时),并采取波浪能装置与张力腿平台在水面处进行锁定联接的自存策略,即二者不再发生垂向及其他5个自由度的相对运动,此时风力机也将处于停机状态(风速大于切出风速 $25\text{ m/s}$ )。如图7所示对该集成结构系统的张力腿受力极值响应模拟结果与对应纯张力腿风力

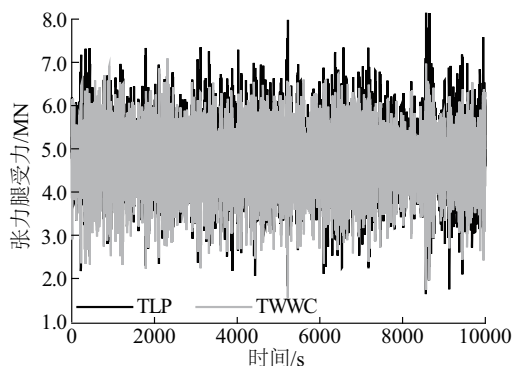


图7 极端海况下集成结构系统张力腿结构受力与纯张力腿风力机对比时程

Fig. 7 Comparison of tension leg force time histories between TWWC and TLP system under extreme sea conditions

机结构的模拟结果进行对比分析。从图7可看出在采用波浪能装置与张力腿平台锁定联接自存策略下,新型集成结构系统(TWWC)的张力腿受力响应极值略小于纯张力腿风力机结构(TLP)的对应响应幅值(约10%),即极端海况下锁定联接自存策略可有效降低集成结构系统的张力腿受力响应极值。这主要是由于附加波浪能装置可有效增加集成结构系统的垂荡附加质量及平台垂荡附加刚度。因此,该新型张力腿式风力机-垂荡式波浪能装置集成结构系统在极端海况下具有较好的安全性。

## 3 结 论

本文提出一种新型张力腿式风力机-垂荡式波浪能装置集成结构系统,并重点研究其在典型最大运行海况和代表性极端海况下的耦合动力响应特征,即主要基于BEM方法分析叶片的空气动力载荷,基于势流理论分析平台结构的水动力载荷,考虑波浪能装置与张力腿平台结构的复杂动力耦合效应,所得主要结论如下:

1)通过对比不同 $B_{pto}$ 参数及不同波浪周期对新型集成结构系统波浪能输出功率的影响规律,初步获得了该新型集成结构系统的最优 $B_{pto}$ 参数值( $2\text{ MNs/m}$ )及最优发电波浪周期( $9\text{ s}$ )。

2)通过对比分析典型最大运行海况下该新型集成结构系统与纯张力腿风力机结构的主要动力响应,指出附加波浪能装置与张力腿平台的动力耦合效应会增大原张力腿平台纵荡及张力腿受力响应幅值约10%,相比于波浪能装置的发电量贡献,风力机的发电量贡献在该集成结构系统中将起主导作用。

3)通过对比分析代表性极端海况下该新型集成结构系统与纯张力腿风力机结构的张力腿结构的极值响应特征,指出波浪能装置与张力腿平台锁定自存策略可有效降低新型集成结构系统张力腿受力的极值响应,即该新型集成结构系统在极端海况的安全性得到了较好验证。

## 4 展 望

该新型风能-波浪能集成结构系统的未来实际应用还面临着诸多挑战,如:物理模型试验验证、集成结构系统长期疲劳损伤分析、极端海况自存策略的优化等,相关科学问题还有待在进一步开展更为深入的研究。

## [参考文献]

- [1] AUBAULT A, ALVES M, SARMENTO A, et al. Modeling of an oscillating water column on the floating foundation WindFloat [C]//30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands: OMAE 2011- 49014, 2011.
- [2] PEIFFER A, RODDIER D, AUBAULT A. Design of a point absorber inside the WindFloat structure [C]// Proceedings of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2011-49015, Rotterdam, Netherlands, 2011.
- [3] MICHAILIDES C, GAO Z, MOAN T. Experimental study of the functionality of a semisubmersible wind turbine combined with flap-type wave energy converters [J]. Renewable energy, 2016, 93: 675-690.
- [4] MICHAILIDES C, GAO Z, MOAN T. 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.
- [5] MULIAWAN M J, KARIMIRAD M, MOAN T. Dynamic response and power performance of a combined spar-type floating wind turbine and coaxial floating wave energy converter [J]. Renewable energy, 2013, 50: 47-57.
- [6] MULIAWAN M J, KARIMIRAD M, GAO Z, et al. Extreme responses of a combined spar-type floating wind turbine and floating wave energy converter(STC) system with survival modes [J]. Ocean engineering, 2013, 65: 71-82.
- [7] WAN L, GAO Z, MOAN T. Experimental and numerical study of hydrodynamic responses of a combined wind and wave energy converter concept in survival modes [J]. Coastal engineering, 2015, 104: 151-169.
- [8] WAN L, GAO Z, MOAN T, et al. Experimental and numerical comparisons of a combined wind and wave energy converter concept under operational conditions [J]. Renewable energy, 2016, 93: 87-100.
- [9] REN N X, GAO Z, MOAN T, et al. Long- term performance estimation of the Spar-Torus-combination (STC) system with different survival modes [J]. Ocean engineering, 2015, 108: 716-728.
- [10] BACHYNSKI E E, MOAN T. Point absorber design for a combined wind and wave energy converter on a tension-leg support structure [C]//Proceedings of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, France: 2013.
- [11] MYHR A, BJERKSETER C, ÅGOTNES A. Levelised cost of energy for offshore floating wind turbine in a life cycle perspective [J]. Renewable energy, 2014, 66: 714-728.
- [12] 任年鑫, 马哲, 欧进萍. 新型海上浮式风力机概念设计 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(10): 1710-1714.  
REN N X, MA Z, OU J P. Conceptual design of a novel floating wind turbine [J]. Acta energiae solaris sinica, 2012, 33(10): 1710-1714.
- [13] REN N X, LI Y G, OU J P. The wind-wave tunnel test of a TLP type floating wind turbine [J]. Journal of renewable and sustainable energy, 2012, 4(6): 299-312.
- [14] JONKMAN J M, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [R]. Golden (CO): National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP- 500- 38060, 2007.
- [15] MORIARTY P J, HANSEN A C. AeroDyn theory manual [R]. National renewable energy laboratory, NREL/EL- 500-36881, 2005.
- [16] ANSYS Inc. ANSYS AQWA User's Manual [M]. Release 13.0, 2010.

## COUPLED DYNAMIC ANALYSIS OF A NOVEL FLOATING WIND ENERGY AND WAVE ENERGY COMBINATION SYSTEM

Ren Nianxin<sup>1,3</sup>, Zhu Ying<sup>1</sup>, Ma Zhe<sup>1,2</sup>, Zhou Mengran<sup>1</sup>

(1. Deepwater Engineering Research Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coast and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In the view of the future need of the exploitation of deep-water rich wind and wave energy resources in China, one novel tension leg platform (TLP) wind turbine (WT) and heave-type wave energy converter (WEC) combined system (TWWC) is proposed. Firstly, the NREL 5 MW wind turbine model has been selected as the research object. The aerodynamic performance is investigated based on the BEM method, and the hydrodynamic loads of both TLP platform and the WEC device is simulated based on the potential theory. The coupled aerodynamic and hydrodynamic numerical model of the TLP WT and heave-type WEC combined (TWWC) system has been established, with the consideration of the multi-body dynamic coupling effect of the power-take off system (PTO) of the WEC device. Secondly, the effect of different PTO parameters of the WEC device on the performance of the wave energy output power has been clarified. Finally, the characteristics of both dynamic coupling responses and the wind-wave output power of the novel TWWC system have been mainly investigated under typical maximum operational sea cases, and the safety of the TWWC system under representative extreme sea case has been verified.

**Keywords:** offshore wind turbines; wave energy conversion (WEC); dynamic analysis; multi-body effect; novel floating