

文章编号: 1005-9865(2021)02-0001-11

畸形波作用下张力腿浮式风力机动力响应特性

唐友刚^{1, 2, 3}, 曲晓奇^{1, 2, 3}, 李 焱^{1, 2, 3}, 张若瑜^{1, 2, 3}, 朱晓宇^{1, 2, 3}, 尹天畅^{1, 2, 3}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学 港口与海岸工程天津市重点实验室, 天津 300350; 3. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘 要: 针对张力腿系泊浮式风力机的基础运动, 忽略柔性构件的影响, 建立气动—水动—系泊非线性耦合运动方程。在运动控制方程中包含张力腿系泊系统的非线性回复刚度, 桨距角控制以及浮式基础运动对空气动力载荷的影响。在波浪载荷的计算中考虑二阶波浪载荷的作用。采用随机频率相位角调制法生成畸形波波面时历, 计算在畸形波作用下张力腿型浮式风力机的动力响应特性。数值模拟结果表明, 在畸形波作用下, 浮式基础的运动及空气动力性能均受到了显著的影响。其中浮式基础的纵荡和纵摇运动分别受二阶差频与和频波浪力的影响, 而垂荡运动的增加则主要是受下沉运动的影响。在畸形波经过的时刻, 风力机的功率系数迅速下降, 水平方向的风载荷波动先减小, 随后其数值急剧下降, 而垂直方向的风载荷波动增大。

关键词: 畸形波; 张力腿; 浮式风力机; 二阶波浪载荷; 下沉运动

中图分类号: P752; TM614 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2021.02.001

Dynamic response characteristics of TLP type offshore floating wind turbine in freak wave

TANG Yougang^{1, 2, 3}, QU Xiaoqi^{1, 2, 3}, LI Yan^{1, 2, 3}, ZHANG Ruoyu^{1, 2, 3},
ZHU Xiaoyu^{1, 2, 3}, YIN Tianchang^{1, 2, 3}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Port and Ocean Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In this research, the offshore floating wind turbine moored by tension leg was studied. The motion of the floating structure in six degrees of freedom was solved considering the effect of the nonlinear restoring stiffness provided by the tension leg. The second-order wave force, pitch control system and the effect of floating structure motion on the aerodynamic force were all included to establish the aero-hydro-mooring coupled nonlinear control equations. The time series of freak wave was generated by the Random Frequency Components Selection Phase Modulation Method. The dynamic response characteristics of TLP type floating offshore wind turbine (FOWT) were obtained under the freak wave. The results show that the motions of floating structure and the aerodynamic force are obviously affected by the freak wave. The surge and pitch motion of the floating structure are mainly affected by second order difference-frequency and sum-frequency wave forces, respectively. And the heave motion is increased by the effect of set-down motion. At the moment when freak wave passes through the floating structure, the power coefficient of wind turbine decreases rapidly. The vibration amplitude of the horizontal wind load is reduced at first, and then it decreases sharply. However, the vibration amplitude of vertical wind load is increased.

Keywords: freak wave; tension leg; floating offshore wind turbine; second-order wave force; set-down motion

收稿日期: 2020-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479134, 51879188, 52001230); 中国博士后科学基金资助项目(2019M651042); 天津大学自主创新基金—一流科研基地项目(2006); 上海交通大学海洋工程国家重点实验室开放基金(GKZD010081)

作者简介: 唐友刚(1952-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋新能源研究。E-mail: tangyougang_td@163.com

通信作者: 李 焱, 博士, 讲师, 主要从事海上风电工程及海洋浮体动力响应研究。E-mail: liyan_0323@tju.edu.cn

目前普遍的发电方式依然是依靠化石燃料,考虑到经济和可持续发展等因素,全世界范围内的发电方式正在发生转变。风能是一种可再生能源,风力发电技术的开发与利用日益受到世界范围内的广泛关注。尽管目前陆上风力机的开发已经具备工业价值,但是随着陆上空间的减少和沿海发达地区对电能需求量的增加,加之海上风强度更大、流动更稳定等客观因素,海上风力机的发展前景远超陆上风力机。随着海上风电开发建设技术逐步成熟,风能开发利用的研究正走向深水。与固定式风力机相比,浮式风力机在经济性、安装工艺、装机容量等方面的优势更为明显^[1]。

当前海上风力机浮式基础的开发技术借鉴了深水油气产业中各种深水平台的相关经验^[2],按照浮式基础形式的不同,海上风力机通常可以分为 Spar 型浮式风力机,半潜型浮式风力机以及张力腿(TLP)型浮式风力机三种。2012 至 2014 年间,日本学者针对采用不同浮式基础结构形式的 5 MW 浮式风力机进行了模型试验研究,结果表明,Spar 型浮式基础运动最大,TLP 型浮式基础升沉、纵摇运动性能最好^[3]。因此,采用 TLP 型浮式基础的风力机近年来受到国内外学者的广泛关注^[4-7],这些研究分别提出了不同形式的 TLP 系泊浮式风力机,并计算了各自的水动力性能及其在风浪联合作用下的动力响应。

当前国内外学者对于海上浮式风力机的动力响应特性做了一系列研究工作,但对于浮式风力机系统在畸形波下的动力学行为研究不足。观测及统计结果均表明,我国海域内存在畸形波发生的情况。研究结果指出,在畸形波的作用下,张力腿平台会产生大幅运动响应,对结构安全造成威胁^[8]。海洋工程领域对于畸形波的研究重点主要集中在畸形波的观测、预报及数值或水池内的重现,邓燕飞等^[9]对这方面的研究工作进行了总结。李志富等^[10]评估了半潜式平台在遭遇畸形波作用下结构的安全性能。刘珍等^[11]以 JIP Spar 平台为研究对象,采用 Longuet Hinggens 模型生成畸形波序列,数值计算在畸形波作用下平台所受的波浪力以及系泊缆索的张力。但需要指出的是,浮式风力机与浮式油气平台存在明显区别,即在作业状态下,浮式风力机所受的环境载荷除波浪力之外,还有风轮上的空气动力。有研究指出,对于采用气动—水动耦合动力学模型分析浮式风力机系统的动力响应是必要的^[12]。而对于深海平台来说,常常只考虑风的拖曳效应,将气动载荷简化处理。

针对畸形波作用下张力腿型浮式风力机所受的波浪载荷、浮式基础运动特性以及浮式风力机的空气动力特性进行研究,采用改进的随机相位角调制方法,生成畸形波波面时历。在此基础上,结合气动力—水动力—下沉非线性刚度耦合动力学模型,计及高阶非线性波浪力、桨距角调节系统以及风轮受气动力与基础运动间耦合关系的因素,在时域内计算畸形波作用下不同波浪载荷成分对 TLP 型浮式风力机动力响应的影响。

1 张力腿型浮式风力机数值分析模型

1.1 张力腿式系泊系统的垂荡运动与下沉运动

海上浮式风力机的运动,可以分为纵荡、横荡、垂荡等 3 个平动自由度及横摇、纵摇、艏摇等 3 个转动自由度,如图 1 中 x_1 至 x_6 所示。对于采用张力腿系泊定位的海洋结构物,在推导其运动方程的刚度项时,为了简化计算通常假定平台做纯水平运动^[13],如图 2 所示。换言之,当风力机基础从初始位置 a 运动至瞬时位置 b 时,两点连线 ab 与张力腿的初始姿态 ad 间呈直角。在这一假定下,张力腿伸长长度记为 ΔL ,则根据胡克定律,张力的增量为 $E\Delta L/L$ 。然而实际上张力腿有着非常大的轴向刚度,因此其产生的轴向变形往往并不显著,使得采用张力腿系泊系统定位的浮式结构物的平动轨迹为弧形,即如图 2 中 $\widehat{ac}$ 所示。当张力腿型风力机的浮式基础产生水平面内的运动时,张力腿的刚性影响使得浮式基础产生下沉运动,改变浮式基础的浮态,引发非线性的垂荡回复力^[14]。在这一因素的影响下,张力腿型浮式风力机的垂荡运动可以分为垂向运动 δ_z 与下沉运动 δ_s 。前者是由于张力腿受拉导致轴向长度增大引起的,而后的成因则是浮体平动。浮式基础总的垂荡运动 x_3 满足以下关系:

$$x_3 = \delta_z - \delta_s \quad (1)$$

$$\delta_s = L - L_z = [x_1^2 + x_2^2 + (rx_6)^2]/(2L) \quad (2)$$

王宾等^[15]通过模型试验验证了这一运动现象的存在,并基于该下沉运动对张力腿平台 6 自由度运动的回复刚度进行了推导^[16],计算了下沉运动对张力腿平台 6 自由度运动的影响。文中采用该刚度矩阵,对张

力腿型浮式风力机的运动进行模拟计算,具体推导过程见 Wang 等^[16]的相关研究成果。

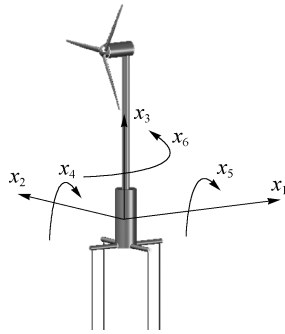


图1 6自由度运动

Fig. 1 Definition of the six DOF motion

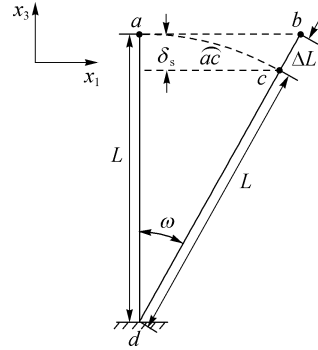


图2 下沉运动示意

Fig. 2 Illustration of the set-down motion

1.2 张力腿型浮式风力机运动控制方程

张力腿型浮式风力机系统的运动控制方程如下所示:

$$(\mathbf{M} + \mathbf{A}_\infty) \ddot{\mathbf{x}}(t) + \int_0^t \mathbf{h}(t - \tau) \dot{\mathbf{x}}(\tau) d\tau + \mathbf{Df}(\dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}(\mathbf{x}) \mathbf{x} = \mathbf{q}(t, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为浮式风力机的质量矩阵; $\mathbf{A}_\infty$ 为频率趋于无穷时的附连水质量矩阵; $\mathbf{h}$ 为延迟函数; $\mathbf{Df}(\dot{\mathbf{x}})$ 和 $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ 分别代表浮式风力机的非线性阻尼与非线性回复刚度; $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}$ 是浮体运动的位移、速度及加速度向量; $\mathbf{q}$ 为包括一阶、二阶和频与差频波浪载荷、气动载荷等在内的外载荷。

1.3 畸形波作用下张力腿型风力机的动力分析模型

畸形波是一种并不常见的海洋波浪,由其瞬间超过有效波高的巨大波高而得名,会对航行船舶及长期系泊的海洋结构物安全性造成较大的威胁。畸形波的基本特征是波峰高而陡、波谷浅而平坦^[17]。目前海洋工程界对于畸形波尚无统一定义,大多采用 1987 年 Klinting 和 Sand^[18] 首先提出的定义方法,即认为畸形波应满足以下条件:1) $H_{\max} \geq 2H_s$; 2) $\eta_c \geq 0.65H_{\max}$; 3) $H_{\max} \geq 2H_1$ 且 $H_{\max} \geq 2H_2$ 。其中 H_s 为随机波的有效波高, $H_{\max}$ 为畸形波的波高, η_c 为畸形波的波峰高, H_1, H_2 分别为畸形波前后相邻波浪的波高。

Tang 等^[19] 对相位角调制方法进行了改进,采用该方法生成了畸形波波面,分析了某浮式生产储卸油装置(FPSO)在畸形波作用下的瞬时动力响应。李焱等^[20] 将刚方法应用在 TLP 平台的动力响应分析中,研究了畸形波作用下不同波浪载荷成分对于 ISSC-TLP 平台的非线性动力学行为。文中同样采用该方法建立畸形波作用下 TLP 风力机的动力分析模型,计算 TLP 风力机的浮式基础在畸形波作用下所受的环境载荷。

对于 TLP 型浮式风力机与 TLP 平台来说,其最主要的区别在于风载荷的作用机理不同。对于传统海洋平台来说,作用在其上的风载荷主要体现为顺风向的风压作用,通常采用经验公式进行计算。而对于风力机来说,风作为一种驱动载荷,促使风轮旋转从而将风能转化为机械能,之后二级转换为电能。传统经验公式无法满足更高精度要求的风力机所受空气动力载荷的计算。对于风力机系统,通常的做法是采用叶素动量理论^[21] 计算风轮上所受的空气动力载荷。

风力机叶片上某个位置处叶素的速度如图 3(a) 所示。图 3(a) 中 $\omega r(1 + a')$ 为叶素平面内的切向速度, $v_0(1 - a)$ 为叶素平面内的轴向速度, v_{rel} 是叶素最终遭遇的相对速度, θ 代表叶素的局部桨距角, α 是叶素的攻角, φ 是入流角。该叶素受到的气动载荷如图 3(b) 所示,其中向量 $\mathbf{R}$ 代表气动升力 $\mathbf{L}$ 和气动阻力 $\mathbf{D}$ 的合力,将合力 $\mathbf{R}$ 沿法向和切向投影则得到 $\mathbf{P}_N$ 和 $\mathbf{P}_T$ 。如果假设沿长度 dr 方向任一叶素的翼型保持不变,基于叶素动量理论,采用迭代法计算叶素的轴向诱导因子 a 及切向诱导因子 a' , 然后依照下式计算各叶素局部载荷。

$$dT = 4\pi r \rho v_0^2 a(1 - a) dr \quad (4)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho v_0 \omega(1 - a)a' dr \quad (5)$$

叶素动量理论基于叶片数无穷的假设,因此在计算的过程中,分别引入叶尖损失因子、叶根损失因子以

及葛劳沃特修正方法进行修正,同时减小叶尖及轮毂处旋涡脱落引发的误差^[21]。

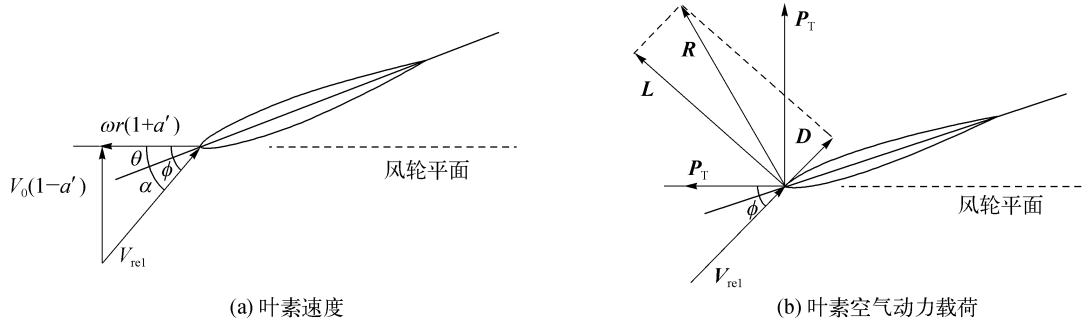


图 3 叶素翼型示意

Fig. 3 Illustration of the blade element

相较于固定式风力机,浮式风力机的基础结构在风浪的作用下时刻处于运动状态,从而在叶片处产生与浮式基础运动速度相关的诱导速度,且该诱导速度也与叶素距浮式基础的相对位置相关。诱导速度的存在,使得叶素所处的相对风速也时刻发生变化,而正常发电状态的风力机转速基本保持稳定,这就使得各叶素攻角时刻变化,引起空气动力特性发生变化。根据刚体力学知识,刚体上任意一点的运动线速度 V_1 可以由刚体在质心处的线速度 V_0 、刚体绕质心的转动角速度 ω 及两点之间的相对位置 R 进行计算,即:

$$V_1 = V_0 + \omega \times R \quad (6)$$

采用该式计算浮式基础刚体运动在叶素处产生的瞬时诱导速度,并将该线速度转换到风轮所处的动坐标系下,得到垂直于风轮平面的速度 V_{out-pl} 与平面内的速度 V_{in-pl} ,并按照式(7)计算叶素攻角,即:

$$\tan \alpha = \frac{v_0(1-a) - V_{out-pl}}{\omega r(1+a') - V_{in-pl}} \quad (7)$$

再将式(7)带入迭代求解诱导因子的过程中,求解风轮所受的空气动力载荷^[21]。

1.4 畸形波作用下张力腿型风力机运动计算流程

图 4 为时域内考虑畸形波作用下张力腿型浮式风力机运动响应的计算流程。在时域计算开始前,浮式基础的静水力及水动力系数通过 DNV GL 的水动力计算软件 WADAM 在频域内预先计算得到,输入运动初值以及畸形波波面后,采用四阶龙格库塔方法在时域内数值求解张力腿风力机的运动响应。为简化计算,暂时未将结构的柔性计入考虑,因此上部风力机与浮式基础可以整体视为一个刚体,这样通过刚体运动计算得到张力腿顶端以及风轮的运动速度等物理量,将其传递到各自对应的模块计算方程(3)右端项中对应的载荷,从而作为下一时刻步的激励载荷,求解下一时刻步的运动,如此直到模拟结束。

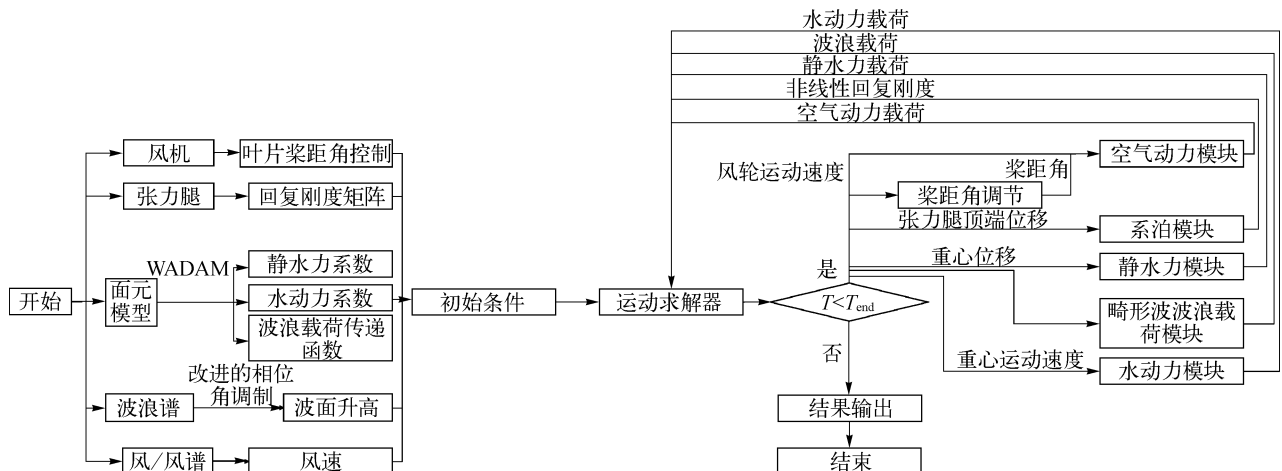


图 4 计算流程

Fig. 4 Flow chart

2 计算模型

2.1 张力腿平台模型参数

研究中采用的 TLP 型浮式风力机模型(如图 5 所示)由两部分构成:其上部风力机为美国可再生能源实验室(NREL)设计的 5 MW 风力机^[22],参数如表 1 所示;下部浮式基础为美国麻省理工学院提出“四脚式”张力腿基础^[23],主尺度参数见表 2。

表 1 NREL-5 MW 风力机参数
Tab. 1 Properties of NREL-5 MW wind turbine

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	5	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	12.1
轴系传动效率	0.944	轮毂高度/m	90
叶片长度/m	61.5	重心高度/m	64.0
额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	11.4	总质量/kg	697 460

表 2 张力腿型浮式基础主尺度
Tab. 2 Principal dimensions of TLP type floating foundation

参数	数值	参数	数值
主体直径/m	18	张力腿数量	4 组,每组 2 根
吃水/m	47.89	张力腿长度/m	151.73
作业水深/m	200	张力腿上端距平台中心/m	27
排水量/kg	12 187 000	抗拉刚度/kN	1 500 000
预张力/kN	3 931	重心距水面/m	-40.612

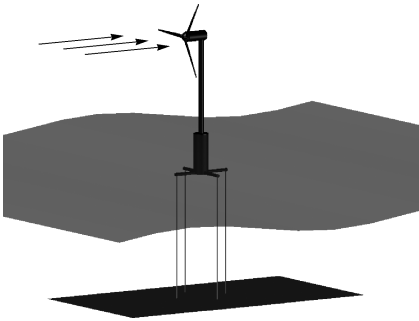


图 5 TLP 型浮式风力机示意
Fig. 5 Illustration of TLP type floating offshore wind turbine

2.2 计算工况

为研究畸形波作用下 TLP 型浮式风力机的动力响应特性,海况环境参数如表 3 所示。

表 3 海况环境参数
Tab. 3 Sea conditions and environmental parameters

参数	数值	参数	数值
平均风速/($m \cdot s^{-1}$)	11.4	谱峰周期/s	10
波浪谱	Jonswap	谱峰因子	3.3
有效波高/m	6	风浪入射方向/($^{\circ}$)	0

相关研究表明,张力腿型浮式风力机的运动分为以横荡、纵荡为代表的低频运动及以垂荡、横摇及纵摇为代表的高频运动。虽然浮式基础各个自由度运动的固有频率均不在波浪频率范围内,但是某些自由度的固有频率却同二阶差频或和频波浪力的频率接近。为研究畸形波作用下的波浪载荷对张力腿型浮式风力机

动力响应影响,数值模拟分为表 4 所示的 4 种工况。

表 4 工况定义
Tab. 4 Definition of load cases

工况	一阶波浪力	二阶和频波浪力	二阶差频波浪力
1	✓	✓	✓
2	✓		✓
3	✓	✓	
4	✓		

3 结果与讨论

3.1 自由衰减数值模拟

首先在无浪无风条件下,对各个自由度分别进行自由衰减数值模拟,在时域内统计风力机运动的固有频率,并将结果与 NREL 的 FAST 软件模拟结果^[23]进行对比,见表 5。

表 5 风力机运动固有频率
Tab. 5 Natural frequency of TLP floating offshore wind turbine

自由度	FAST 模拟结果/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	文中结果/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	误差/(%)
纵荡	0.104	0.100	-3.64
横荡	0.104	0.100	-3.64
垂荡	2.749	2.713	-1.30
横摇	1.401	1.569	12.02
纵摇	1.389	1.569	12.94
艏摇	0.611	0.701	14.81

自由衰减模拟结果表明,文中的计算结果与采用 FAST 的计算结果在 3 个平动自由度基本相吻合,但在 3 个转动自由度存在 15%以内的误差,这是因为在这些自由度上,文中计算程序考虑了由于下沉运动引起的非线性刚度。此外,在水平面内 3 个自由度的自由衰减计算时,发现垂荡自由度的运动呈现出耦合特性,即垂荡运动在前 50 s 模拟中以垂荡自身的固有频率响应为主,此后则按照耦合自由度的固有频率做衰减运动,如图 6 所示。而这一现象同样是由于考虑了张力腿耦合下沉刚度导致的,这也从另一个方面再次印证了采用张力腿型浮式风力机运动自由度之间的耦合效应。

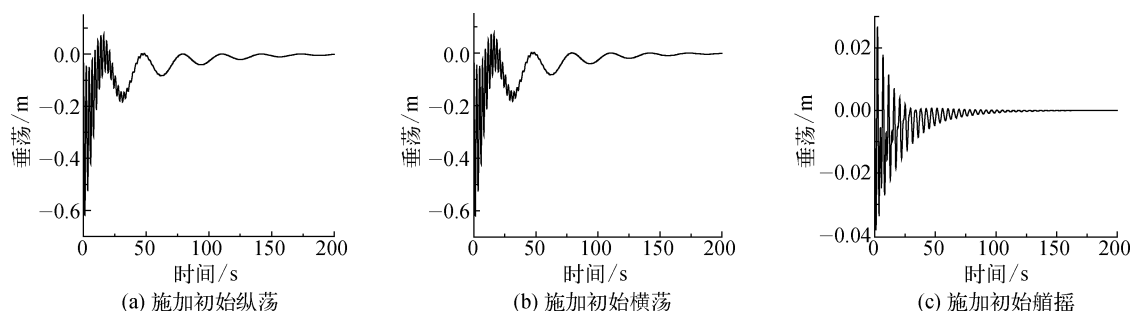


图 6 水平面内运动初值在垂荡自由度引起的自由衰减运动

Fig. 6 Free decay motion in heave caused by the initial position of horizontal motions

3.2 畸形波作用下浮式风力机的动力响应

采用改进的相位角调制方法生成畸形波时历,如图 7 所示,生成的畸形波波峰聚焦在 1 000 s。基于气动力—水动力—下沉非线性刚度耦合动力学模型,编制张力腿型浮式风力机动力响应计算程序,分析在该畸形波作用下,浮式风力机系统的动力响应特性,数值模拟步长设为 0.1 s。

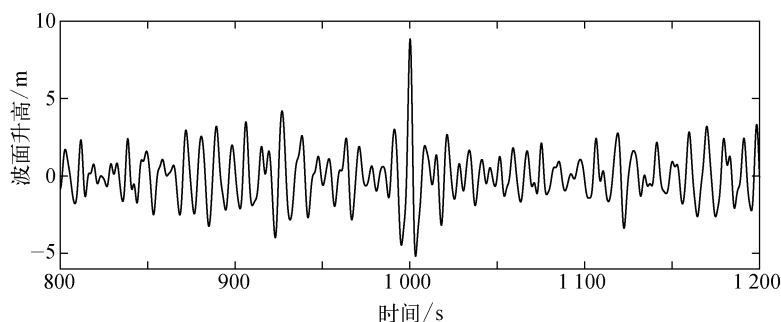


图7 畸形波波面升高时历曲线

Fig. 7 Time series of freak wave elevation

3.2.1 风力机空气动力性能

作为最主要评价指标之一,功率系数 C_p 的高低及稳定程度代表了风力机的性能,按照下式计算:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v_0^3 A} \quad (8)$$

式中: P 为风力机输出功率, A 为风力机叶片的扫略投影面积。图8为在畸形波发生时刻风力机功率系数的时历曲线。此外,风力机系统在遭遇极端海洋环境时,通过改变叶片的桨距角,即改变图3(a)中的 θ 值,可调节气动载荷的大小,从而保护机械和电路系统,叶片瞬时桨距角如图9所示。可以看出,当风力机遭遇畸形波时,风力机的输出功率瞬间大幅下降,而桨距角则大幅增加。这一现象直接表明,在畸形波的影响下,风力机的气动性能受到了大幅影响。这是因为风力机的气动性能与浮式基础运动存在着显著的耦合关系。此外,从工况1和工况2两种计及二阶差频波浪力的功率系数曲线中能够看到,在遭遇畸形波时,风力机的功率系数甚至小于0。换言之,在畸形波诱发浮式基础产生大幅运动响应的同时,某些严重的情况下可能会造成风力机无法输出功率。

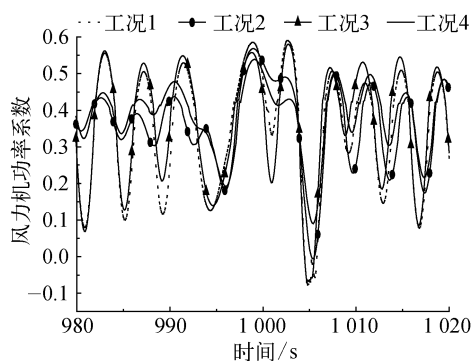


图8 风力机功率系数

Fig. 8 Power coefficient of wind turbine

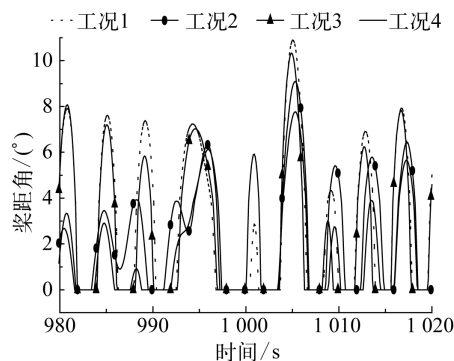


图9 瞬时桨距角

Fig. 9 Pitch angle of blades

气动载荷的大小是影响浮式风力机动力特性的另一重要指标。畸形波发生时刻风轮上受到的空气动力载荷时历曲线如图10所示。从气动载荷的时历曲线中可以看到,二阶差频波浪载荷间接引起了气动载荷的大幅波动。当基础遭遇畸形波作用时,气动载荷的水平分量首先维持在较大的水平,随后迅速减小,但垂直分量的变化则呈现出放大的趋势。这一变化趋势同样是由于浮式风力机系统基础与风力机之间的耦合关系导致的。由于在畸形波作用下基础产生了剧烈的运动,在高耸的塔柱影响下引发了风轮处绝对速度的大幅变化,从而导致了叶片所受气动载荷的大幅变化。

3.2.2 浮式基础的运动响应

在畸形波发生时刻,考虑不同波浪成分作用时风力机浮式基础各自由度的运动响应差别较大。因此文中根据模拟结果,分别针对风力机浮式基础不同自由度的运动进行详细的讨论与分析,从而总结出畸形波对

TLP 型浮式风力机的运动影响规律。风力机浮式基础在 4 种不同工况下纵荡自由度的运动时历曲线如图 11 所示。从图中可以看出,在经历畸形波的作用后,包含二阶差频波浪力的两种工况即工况 1 和 2 的运动幅值比另外两种工况显著增大。但从图 11(c)来看,二阶差频波浪力的幅值明显小于一阶波浪力与二阶和频波浪力。因此可以得出结论,波浪载荷的幅值并非是决定基础运动响应大小的唯一因素。产生这一现象的原因是纵荡固有频率较低,二阶差频波浪力的频率与纵荡固有频率更为接近,从而激发了大幅的纵荡运动响应。由此可以总结出二阶差频波浪力的存在是造成纵荡运动显著增大的主要因素。

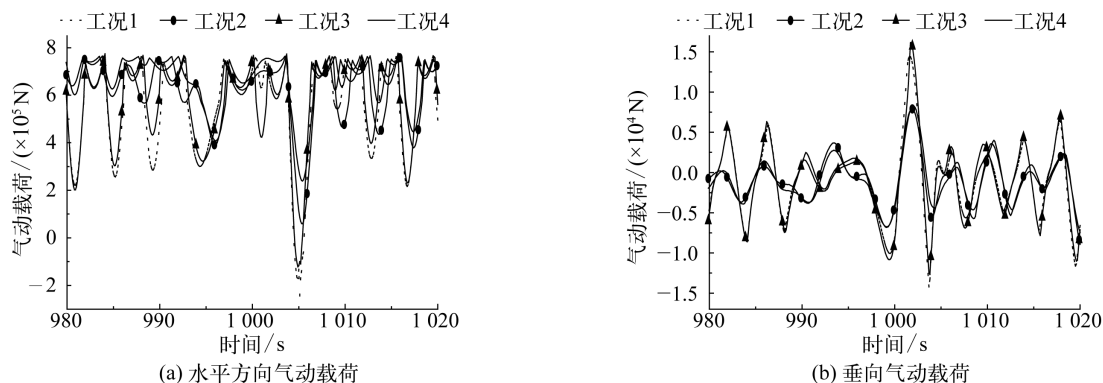


图 10 风轮上气动载荷

Fig. 10 Aerodynamic forces on wind turbine rotor

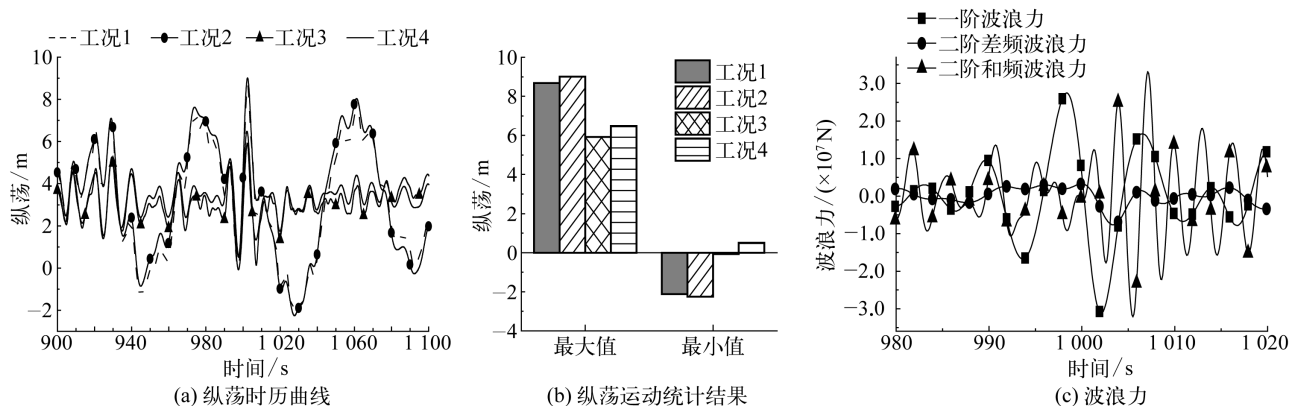


图 11 浮式基础纵荡运动结果与波浪力

Fig. 11 Motion and wave load in surge

此外,从图 11(a)可以看到,纵荡运动的极值滞后于畸形波波峰出现。从图 11(c)中可以看出,畸形波作用下浮体所受的波浪载荷瞬间大幅增加,呈现出冲击特性。以往研究表明^[24],结构受到冲击载荷时,动力响应的极值可能出现在两个阶段,即载荷作用时或载荷作用后。当冲击载荷的频率和结构固有频率相近时,动力响应的极值出现在冲击载荷作用阶段,而当冲击载荷频率远高于结构的固有频率时,动力响应的极值则滞后于载荷出现。对于张力腿型风力机来说,其纵荡运动的固有频率较低,远低于波浪载荷的卓越频率,因此纵荡运动的幅值会在畸形波波峰过境之后出现。另一方面,一阶波浪力的极值随畸形波波峰出现而出现,二阶和频波浪载荷在畸形波波峰通过之后显著放大,而二阶差频波浪载荷在畸形波作用下波动增大,但与其他两种波浪载荷成分比起来,其增幅并不显著。

不同工况下纵摇运动的响应幅值与作用在该自由度上的波浪力如图 12 所示。尽管从图 12(c)中可以看出,一阶波浪力增大的程度远大于其他两种波浪力,但图 12(a)和(b)的结果显示,在二阶和频波浪力的作用下,浮式基础的纵摇运动会进一步放大,其原因在于二阶和频波浪力的频率和纵摇固有频率都属于高频,且数值相近,即使较小的波浪力幅值也会引发纵摇运动的共振响应。另一方面,从三种波浪载荷成分的时历结果可以看到,二阶差频波浪力的最大值在畸形波波峰之后出现,但其余两种成分的最大值均早于波峰。但通过对比图 11(a)和图 12(a)可以看到,最大纵摇出现在二阶和频波浪力达到峰值的瞬间,证明二阶和频波浪力是畸形波作用下影响纵摇运动的主要因素。

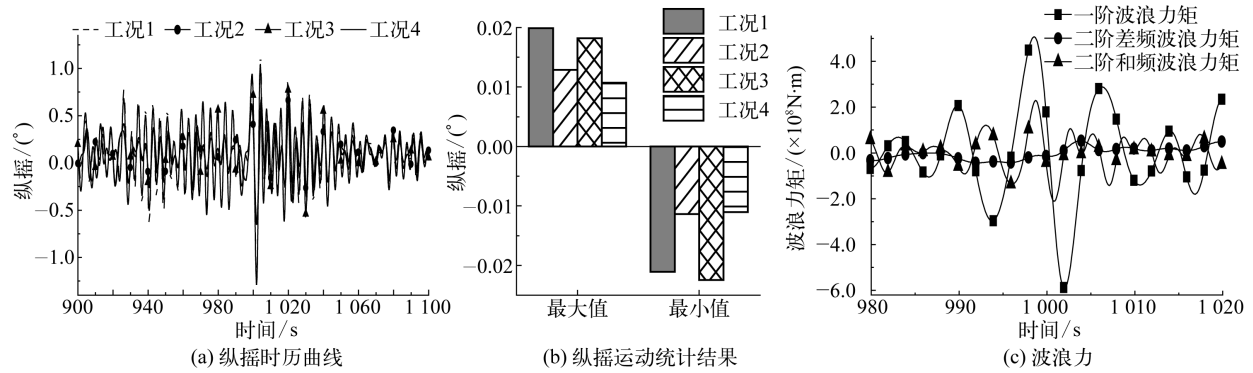


图 12 浮式基础纵摇运动结果与波浪力

Fig. 12 Motion and wave load in pitch

不同工况下垂荡运动的响应时间历程及统计结果与作用在该自由度上的波浪力如图 13 所示。从图 13 (a)和(b)来看,对于工况 1 和 3,即包括二阶和频波浪力的两种工况,浮式基础的垂荡运动在畸形波的作用下明显增大。从自由衰减得到的固有频率来看,垂荡运动属于高频运动,因此畸形波作用下的动力响应特性应与纵摇运动相似。但与纵摇运动不同的是,对于工况 1 和 2 即包含二阶差频波浪力的两种工况,在畸形波经过后垂荡运动的最小值要小于工况 3 和 4。从图 13(c)来看,在畸形波发生时刻,垂荡运动的瞬间大幅变化是由增大的二阶和频力导致。此外,根据前文描述的张力腿系泊浮式结构物的运动特性,可以推论出在浮式风力机受到畸形波作用产生大幅度水平运动的情况下,由于张力腿的刚度引发了下沉运动,从而导致基础的垂荡与水平面运动存在显著的耦合关系。所以当畸形波作用于浮式风力机系统时,二阶差频波浪力会使得纵荡运动的幅值增大,从而进一步导致幅值较大的下沉运动,如图 14 中工况 1 和 2 的结果所示。图 15 为同时考虑一阶波浪力、二阶和频与差频波浪力的作用,浮式基础垂荡及其两种成分的时历曲线。根据图 15 的结果可以发现,在畸形波作用时,由于下沉运动的急剧变化,而导致了垂荡运动幅值的大幅增加。

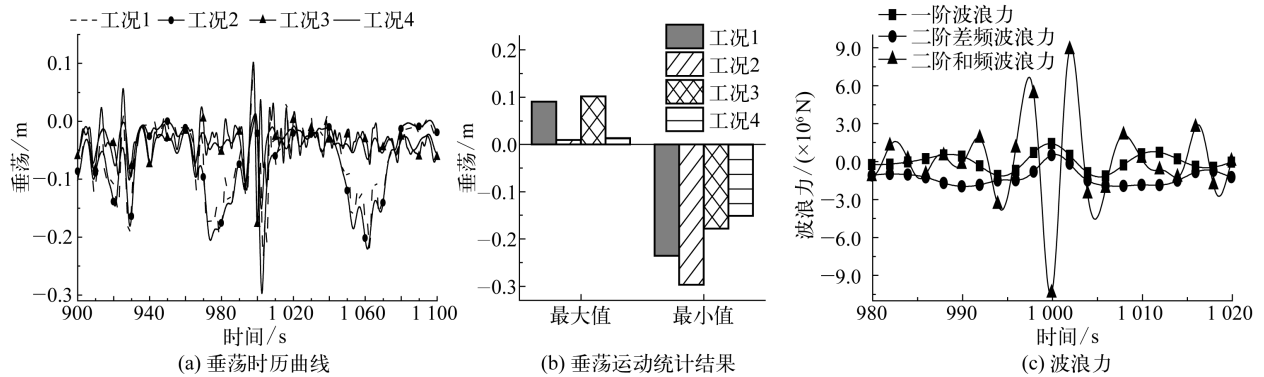


图 13 浮式基础垂荡运动结果与波浪力

Fig. 13 Motion and wave load in heave

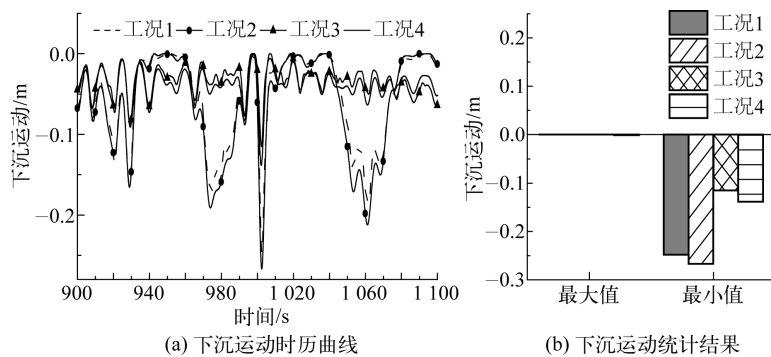


图 14 下沉运动时历曲线与统计结果

Fig. 14 Time series and statistics of set-down motion

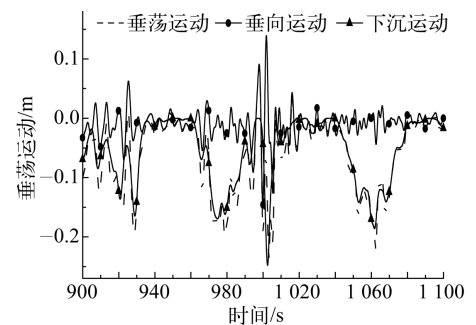


图 15 工况 1 的垂荡运动各成分对比

Fig. 15 Heave components in Load Case 1

4 结 语

以张力腿系泊的浮式风力机为模型,考虑浮式基础的运动与张力腿系统提供的非线性回复刚度,建立气动—水动—系泊非线性耦合运动方程。在考虑二阶波浪力、桨距角控制以及浮式基础运动对于空气动力载荷影响的基础上,分析了畸形波作用下张力腿型浮式风力机的动力特性,结果表明:

1) 进行纵荡、横荡、艏摇的自由衰减模拟时,由于运动自由度间的耦合因素,垂荡也会发生衰减运动,其特征为先以垂荡固有频率运动,随后再以耦合运动的固有频率进行运动,直至能量耗散完毕。

2) 根据固有频率的不同,张力腿型风力机浮式基础的纵荡和横荡运动属于低频运动,而纵摇、横摇、垂荡运动属于高频运动。在畸形波的作用下,浮式基础的运动响应在短时间内明显增大。其中低频运动的增幅主要由二阶差频波浪力引起,而高频运动的增幅则由二阶和频波浪力引起。但是,垂荡运动幅值的变化则主要是由于纵荡幅值变大而引起的下沉运动所导致的。所以在畸形波作用下,二阶和、差频波浪力都会放大张力腿型浮式风力机的垂荡运动。

3) 由于风力机基础运动与风力机气动载荷之间存在耦合关系,因此畸形波引发了风力机输出功率和气动特性的大幅改变。张力腿型浮式风力机遭遇畸形波会引发输出功率以及气动载荷水平分量的骤降,而气动载荷的垂直分量波动增大。

参考文献:

- [1] 刘中柏,唐友刚,王涵,等. 半潜型风电浮式基础运动特性试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015(1): 51-56. (LIU Zhongbai, TANG Yougang, WANG Han, et al. Experimental study of motion behaviors for semi-submersible floating foundation of wind power[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015(1): 51-56. (in Chinese))
- [2] HSU Weiting, THIAGARAJAN K P, MACNICOLL M, et al. Prediction of extreme tensions in mooring lines of a floating offshore wind turbine in a 100-year storm[C]//Proceedings of ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2015: OMAE 2015-42015.
- [3] NIHEI Y, IJIMA K, MURAI M, et al. A Comparative study of motion performance of four different FOWT designs in combined wind and wave loads [C]//Proceedings of ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2014: OMAE2014-24643.
- [4] TRACY C C H. Parametric design of floating wind turbines[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [5] 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.
- [6] 黄致谦,丁勤卫,李春. 新型张力腿平台漂浮式风力机动态响应研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(9): 156-163. (HUANG Zhiqian, DING Qinwei, LI Chun. Study on dynamic response of floating wind turbine with a new type of tension leg platform[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(9): 156-163. (in Chinese))
- [7] SHEN Macheng, HU Zhiqiang, LIU Gelang. Dynamic response and viscous effect analysis of a TLP-type floating wind turbine using a coupled aero-hydro-mooring dynamic code[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 800-812.
- [8] RUDMAN M, CLEARY P W. Rogue wave impact on a tension leg platform: The effect of wave incidence angle and mooring line tension[J]. Ocean Engineering, 2013, 61(6): 123-138.
- [9] 邓燕飞,杨建民,李欣,等. 波浪水池中畸形波生成的研究综述[J]. 船舶力学, 2016(8): 1059-1070. (DENG Yanfei, YANG Jianmin, LI Xin, et al. A review on the freak wave generation in the wave tank[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016(8): 1059-1070. (in Chinese))
- [10] 李志富,任慧龙,李辉. 畸形波作用下半潜式平台的极限生存能力评估[J]. 船舶力学, 2016(5): 591-599. (LI Zhifu, REN Huilong, LI Hui. Safety of semi-submersible platform under extreme waves[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016(5): 591-599. (in Chinese))
- [11] 刘珍,茅润泽,马小剑,等. 畸形波作用下 JIP Spar 平台波浪力分析[J]. 海洋工程, 2015, 33(4): 19-27. (LIU Zhen, MAO Runze, MA Xiaojian, et al. Hydrodynamic characteristics research of freak waves interaction with JIP Spar[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(4): 19-27. (in Chinese))
- [12] LI Jiawen, TANG Yougang, YEUNG R W. Effects of second-order difference-frequency wave forces on a new floating platform for an offshore wind turbine[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2014, 6(3): 033102.
- [13] JAIN A K. Nonlinear coupled response of offshore tension leg platforms to regular wave forces[J]. Ocean Engineering, 1997, 24

- (7): 577-592.
- [14] SENJANOVIĆ I, TOMIĆ M, HADŽIĆ N. Formulation of consistent nonlinear restoring stiffness for dynamic analysis of tension leg platform and its influence on response[J]. *Marine Structures*, 2013, 30(1): 1-32.
- [15] 王宾. 考虑下沉运动的张力腿平台在复杂海况下的耦合运动响应分析[D]. 天津: 天津大学, 2017. (WANG Bin. Coupled dynamic analysis of tension leg platform considering set-down motion under complex sea conditions[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [16] WANG Bin, TANG Yougang, LIU Liqin, et al. Nonlinear random motion analysis of a tension leg platform considering the set-down motion of a floating body[J]. *China Ocean Engineering*, 2017, 31(2): 210-219.
- [17] 刘赞强, 张宁川. 基于 Longuet-Higgins 模型的畸形波模拟方法[J]. *水道港口*, 2010, 31(4): 236-241. (LIU Zhanqiang, ZHANG Ningchuan. Method for simulating freak wave based on Longuet-Higgins model[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2010, 31(4): 236-241. (in Chinese))
- [18] KLINTING P, SAND S. Analysis of prototype freak waves[C]//Darlymple R. Proc. Spec. Conf. Near-shore Hydrodynamics. ASCE, 1987.
- [19] TANG Yougang, LI Yan, WANG Bin, et al. Dynamic analysis of turret-moored FPSO system in freak wave[J]. *China Ocean Engineering*, 2016, 30(4): 521-534.
- [20] 李焱, 唐友刚, 王宾, 等. 畸形波作用下二阶波浪载荷对张力腿平台动力响应的影响[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(3): 167-173. (LI Yan, TANG Yougang, WANG Bin, et al. Second order wave excitation load's effect on dynamic response of TLP in freak wave[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(3): 167-173. (in Chinese))
- [21] MORIARTY P J, HANSEN A C. AeroDyn theory manual[M]. Salt Lake City, Utah, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [22] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO., 2009.
- [23] MATHA D. Model development and loads analysis of an offshore wind turbine on a tension leg platform with a comparison to other floating turbine concepts; April 2009[R]. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO., 2010.
- [24] 唐友刚. 高等结构动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002. (TANG Yougang. Advanced structural dynamics[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. (in Chinese))