

廖迎娣, 王露, 张鹏程, 等. 环境荷载联合作用下海上风电结构动力响应分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(3): 206-216.  
LIAO Yingdi, WANG Lu, ZHANG Pengcheng, et al. Dynamic response analysis of offshore wind turbine structures under combined environmental loads[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(3): 206-216.

# 环境荷载联合作用下海上风电结构动力响应分析

廖迎娣<sup>1,2,3</sup>, 王露<sup>3</sup>, 张鹏程<sup>4</sup>, 陈达<sup>1,2,3</sup>

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘要:** 为研究海上风电结构在复杂的海洋环境中承受环境荷载(风、波、冰、流)的联合作用时, 结构产生的剧烈的动力响应问题。文章以三脚架基础海上风电结构为研究对象, 采用 ANSYS 有限元软件建立其整体模型并进行荷载(风、波、流和风、冰、流)联合作用下的静力校核, 通过对环境荷载联合作用下的三脚架基础海上风电结构进行瞬态分析, 掌握其动力响应的特性及规律。结果表明: 三脚架基础结构的一、二阶自振频率均为 0.285 Hz, 在所选风机允许的频率范围内, 可以保证整体结构不会与风机转动发生共振; 风荷载在风、波、流荷载联合作用下主导控制结构响应的稳态波动, 冰荷载在风、冰、流荷载联合作用下主导控制结构的稳态振动过程; 塔筒顶端呈现的位移和加速度响应均远大于三脚架基础顶端; 环境荷载联合作用下结构动力响应是环境荷载单独作用下动力响应叠加的结果。

**关键词:** ANSYS 软件; 三脚架基础海上风电; 环境荷载联合作用; 动力响应

**doi:** 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.03.024

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)03-0206-11



## Dynamic response analysis of offshore wind turbine structures under combined environmental loads

LIAO Yingdi<sup>1,2,3</sup>, WANG Lu<sup>3</sup>, ZHANG Pengcheng<sup>4</sup>, CHEN Da<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 4. HydroChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to study the violent dynamic response of offshore wind turbine structures under the combined action of environmental loads (wind, wave, ice and flow) in the complex marine environment, the offshore wind turbine structure based on tripod is taken as the research object in this paper and the ANSYS finite element software is used to establish its overall model. First of

收稿日期: 2020-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779087); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018B43014); 高等学校学科创新引智计划(B12032)

作者简介: 廖迎娣(1977—), 女, 副教授, 博士, 主要从事港口航道工程、近海工程混凝土结构腐蚀防护与修复技术方面的研究。E-mail: liaoyingdi@hhu.edu.cn

通信作者: 陈达(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事港口航道工程结构、海上风电机组基础结构、近海工程混凝土结构腐蚀防护与修复技术方面的研究。E-mail: chenda@hhu.edu.cn

all, static strength checking is carried out when tripod base is exposed to the wind, wave and current loads or wind, ice and current loads. Then dynamic analysis is carried out in order to make clear the dynamic response characteristics of the tripod structure. The results show that the first and second order natural vibration frequency of the tripod foundation structure is 0.285 Hz, so the whole structure can be guaranteed not to resonate with the rotation of the wind turbine within the allowable frequency range of the selected wind turbine. Wind load dominates the steady state fluctuation of the structure response under the combined action of wind, wave and flow load, and that ice load dominates the steady state vibration of the structure under the combined action of wind, ice and flow load. The displacement and acceleration responses on the top of the tower barrel are much larger than those on the top of the tripod base. The dynamic response of the structure under the combined action of environmental loads is the result of the superposition of the dynamic response under the single action of environmental loads.

**Keywords:** ANSYS software; offshore wind turbine based on tripod; combined action of environmental loads; dynamic response

## 0 引言

风能资源作为一种清洁的可再生能源一直倍受世界各国的关注,无论是陆上风能资源还是海上风能资源,均是各国研究与开发的重点。海上风电结构用于开发海上风能资源,其基础型式的选择是风电结构设计时的关键之一,常见的海上风电基础型式有重力式、单桩、三脚架、导管架和漂浮式。三脚架基础属于桩承式基础,其桩基通常围绕中心柱等距离布置成稳定的三角,桩顶套管通过三个斜撑与中间立柱相连形成三脚架,对上部结构起到足够的支撑作用,具有良好的稳定性和整体刚度,承载能力较大,适用于水深为 25~50 m 的海域。近海海域(水深 0~30 m)风能资源丰富,是目前海上风能发电主要开发领域,三脚架基础广泛应用于此范围海域<sup>[1]</sup>。

海上风电结构在复杂的海洋环境中承受着风、波、冰、流、地震等荷载的不断作用,结构由此产生的剧烈的动力响应问题受到广泛关注与重视。尤其是冰区海域极端条件下的海冰荷载引起结构发生稳态振动时,结构的动力响应被放大,结构的疲劳和破坏由此产生。对风电基础结构进行模态分析获得其自振特性,而后分析各环境荷载(风、浪、冰、地震等)单独作用和联合作用下基础结构的动力响应是风电基础动力特性研究的着重点,这对实际工程风电结构安全设计具有重要意义。

海上风电结构动力分析目前研究较多的是单一环境荷载作用下结构的动力响应,多种环境荷载联合作用下海上风电结构的动力响应相关研究较少,于是引起中外学者的广泛关注。张毅<sup>[2]</sup>开展了风冰荷载联合作用下单桩式海上风机的动力响应和疲劳损伤的研究,结果表明当海冰荷载频率接近风电基础结构的固有频率时,结构动力响应巨大。李炜等<sup>[3]</sup>建立单桩、三桩、四桩导管架基础模型,研究其在环境荷载(地

震和波浪)以及冲击、简谐荷载作用下的瞬态动力分析结果,发现当桩的数量增加,结构刚度增大,动力响应递减。沙鑫<sup>[4]</sup>分别将随机风荷载单独形式、波浪荷载联合静态风荷载、波浪荷载联合随机风荷载施加到支撑结构模型上,通过瞬态动力分析确定了结构的最大位移和最大应力的位置。CHENG<sup>[5]</sup>研究了阵风 and 波浪荷载的组合,结果表明在极限波高和最大阵风之间的延迟可以有效降低支撑结构的动态响应。ALATI 等<sup>[6]</sup>建立了海上风电单立柱三桩基础和导管架式基础模型,并且对于塔顶风机部分建模考虑了叶片影响。动力响应分析结果表明地震荷载在联合荷载(风荷载、波浪荷载和地震荷载)中占据控制地位。

因此,对于海上风电结构在联合荷载作用下的动力特性还需要深入研究。本文采用 ANSYS 有限元软件建立三脚架基础海上风电结构整体模型并进行环境荷载(风、波、流和风、冰、流)联合作用下的静力校核,通过对环境荷载联合作用下的三脚架基础海上风电结构进行瞬态分析,掌握其动力响应的特性及规律。

## 1 整体结构有限元模型建立

本文选用的海上风电基础三脚架基础参考 ZHANG<sup>[7]</sup>的文章,风机选用传统的迎风、变速、水平轴风力涡轮机——NREL 5 mW 风机。由于本文主要开展基于三脚架基础的海上风电结构动力响应特性的相关研究,尤其关注的是塔筒结构的动力响应,所以在整体结构建模前对此三脚架基础结构作出以下简化:塔筒顶端的风机叶片、轮毂、机舱等构件采用集中质量点简化考虑;采用假想嵌固点方法<sup>[9]</sup>将桩基固定在海底泥面线以下 6 倍桩径处。

该海上风电三脚架基础结构所在海域泥面线高程 -30.00 m,水面高程 0.00 m,基础顶端高程 +10.00 m,风机高程 +90.00 m。结构采用 3 根钢管桩作为基础,桩径 2.3 m。桩基按边长为 26 m 的正三角形布置。

桩基上部三脚架结构的组成: 桩顶套管通过斜撑与中间立柱相连接, 套管间设置水平撑以进一步提高结构稳定性。桩顶套管的直径为 2.6 m, 其高程范围为 -30.00~-16.00 m。模型整体结构简化示意图如图 1 所示, 包括上部塔筒和下部三脚架基础。使用 ANSYS 软件中合理的单元类型对简化模型进行整体结构模型建立, 建立的 ANSYS 有限元模型如图 2 所示。

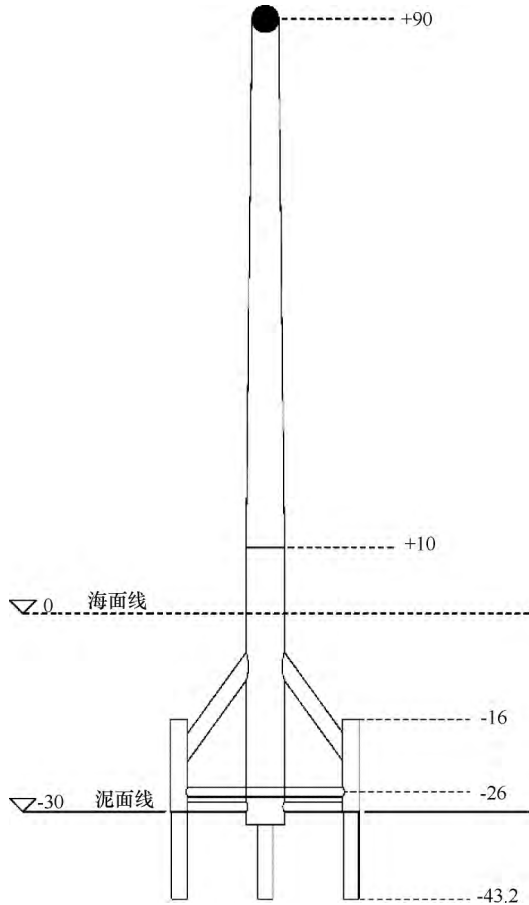


图 1 整体结构简化示意(单位: m)

Fig. 1 Simplified schematic diagram of overall structure (Unit: m)

## 2 环境荷载的模拟和施加

### 2.1 风荷载模拟和施加

对于海上风电结构而言, 考虑风荷载作用的范围是塔筒顶部的风机部分和支承风机的塔筒部分, 其余部分所受风荷载可以不计。为了将飘忽不定的风进行研究, 根据工程中实测风资料数据将其分开进行描述, 把风相对稳定的部分可以称为平均风, 而不规则变化的部分称为脉动风。

#### 2.1.1 平均风荷载

平均风的风速分布采用指数分布<sup>[10]</sup>

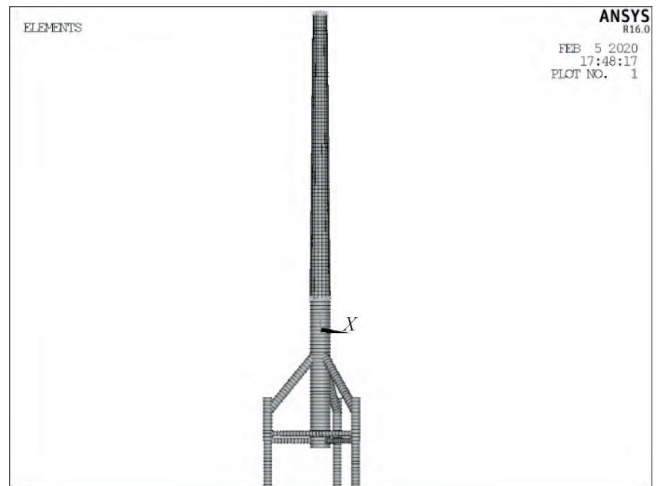


图 2 整体结构有限元模型示意

Fig. 2 Integral structure finite element model

$$\frac{\bar{v}(z)}{\bar{v}(z_b)} = \left(\frac{z}{z_b}\right)^\alpha \quad (1)$$

式中,  $\bar{v}(z)$  为竖直方向上距地表任意距离  $z$  处的平均风速(m/s);  $\bar{v}(z_b)$  为竖直方向上距地表参考距离  $z_b$  处的平均风速(m/s);  $\alpha$  为风速轮廓线指数。

风机部分和塔筒部分的结构特征和所受风速分布存在差异性, 风荷载应分别计算。风机所受的气动荷载<sup>[10]</sup>以集中力的形式施加在塔筒顶部; 塔筒的结构特征决定了其在竖直方向上不同高度处的所受的平均风速和受风面积的差异, 因此塔筒部分的风荷载<sup>[12]</sup>需要沿塔筒高度方向每隔 1 m 以集中力的形式施加。

#### 2.1.2 脉动风荷载

脉动风速具有随机性, 其动力作用不能忽视, 可以通过脉动风速的功率谱反映其各频率组成在整个风场中的作用大小, 通过空间相关性函数来体现各脉动风速点之间的相互影响, 据此将脉动风场的特性呈现出来。

脉动风采用常见的脉动风速功率谱<sup>[12]</sup>中的 Davenport 谱

$$S_v(n) = 4k\bar{v}_{10}^2 \frac{x^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \quad (2)$$

$$x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}} \quad (3)$$

式中,  $S_v(n)$  为脉动风速功率谱函数;  $n$  为脉动风频率(Hz);  $k$  为地面粗糙度系数, 范围在 0.003~0.03, 本文取 0.03;  $\bar{v}$  为竖直方向上距离地面 10 m 高度处的风速(m/s)。

本文采用线性滤波法(自回归 AR 法模型)进行脉动风速模拟。模拟的脉动风场在竖直方向上的范围为

高程 10 m 处塔筒与中间立柱交界点的至塔筒顶部, 将此范围内的部分进行 5 m 等距划分, 共取 16 个脉动风速模拟点, 每点的脉动风速采用线性滤波法(自回归 AR 法模型)进行脉动风速模拟, 以此为基础求出各点的瞬时风荷载, 脉动风速模拟具体参数如表 1 所列。

表 1 脉动风速模拟主要参数

Table 1 Main parameters of fluctuating wind speed simulation

脉动风速谱	Davenport 谱
模拟风速时长/s	200
10 m 高度处的标准风速/ $m \cdot s^{-1}$	35.2
AR 模型阶数	4
时间步长/s	0.1
地面粗糙度系数	0.003

### 2.1.3 瞬时风荷载

将模拟得到的各点脉动风速与相应的平均风速叠加得到真实作用于结构的各点的瞬时风速, 而每个风速模拟点处瞬时风荷载的大小根据模拟点的间隔距离和结构尺寸计算, 并以随时间不断变化的集中力形式作用于各点。模拟的最低点(三脚架基础顶端)和最高点(塔筒顶端)处瞬时风荷载时程如图 3 所示。

## 2.2 冰荷载模拟和施加

挤压、弯曲、断裂和屈曲是海冰与结构物相互作用时所表现的四种主要破坏形式, 其与直立结构相互作用时挤压破坏是最主要的形式。冰荷载作用在风电结构水面线处的节点上, 根据冰速不同, 冰荷载分静冰荷载和动冰荷载。

### 2.2.1 静冰荷载

低冰速时海冰与结构相互作用, 发生挤压破碎, 这个过程可看作准静态过程<sup>[15]</sup>。静力分析时将海冰在该过程中产生的稳定冰力(极值静冰力)作为设计荷载, 荷载的施加是在结构水面线处施加一个集中力。

在不同尺寸的结构前, 海冰的破坏形式和冰力特性存在显著差异。娄春娟<sup>[1]</sup>就不同的冰厚和结构尺寸对不同极值静冰力公式计算结果进行了对比分析。研究得出, 对于海上风电结构应当采用 API-RP-2 N 规范<sup>[13]</sup>所推荐的基于极限冰压力理论得

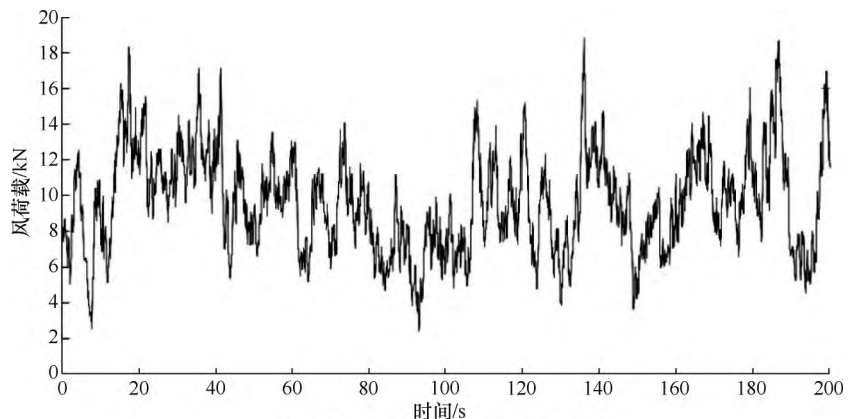
$$F = kDh\sigma_c \quad (4)$$

式中,  $F$  为作用于结构的海冰荷载(kN);  $k$  为折减系数, 本文取为 0.7;  $D$  为挤压面的宽度(m);  $h$  为海冰厚度(m);  $\sigma_c$  为海冰单轴抗压强度(kPa)。

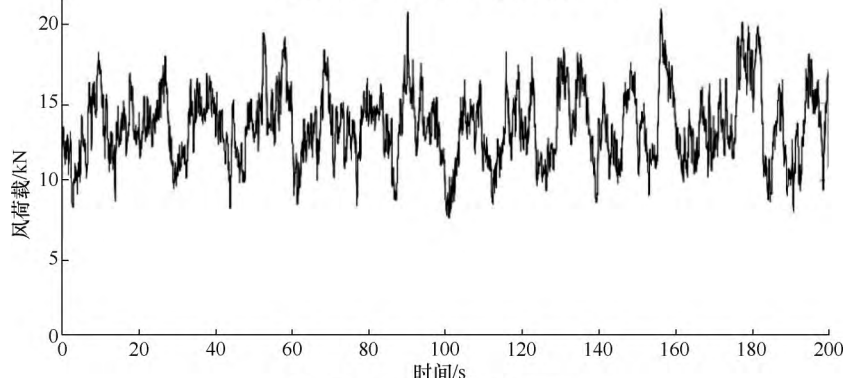
### 2.2.2 动冰荷载

随着冰速的增加, 海冰的破碎过程会与结构振动产生相互影响, 此时冰力变化与结构响应的变化呈现一致性, 由此产生的动冰荷载的频率集中在结构的固有频率附近, 结构会发生简谐形式的稳态自激振动现象, 这对结构会造成极大的损伤。极端冰况下海冰对结构的动力放大现象明显, 冰振响应极为显著, 对风电基础结构和塔筒顶端的电机及附属设备造成影响, 动力分析是应重点考虑。KÄRNÄ<sup>[14]</sup>基于海上平台结构的观测数据用简化的三角波时域函数来表征自激振动冰力时程, 如图 4(a) 所示。本文也采用此“锯齿状”冰力函数模拟冰力时程曲线, 如图 4(b) 所示。

图 4(a) 中  $F_{max}$  为冰力最大值, 可取为极值静冰力;  $\Delta F = qF_{max}$ ,  $q = 0.1 \sim 0.5$ ;  $F_{mean}$  为冰力平均值;  $T$  为冰力周期, 稳态冰力的频率锁定在结构固有频率, 因此计算中可近似取为结构固有周期;  $\alpha$  是



(a) 三脚架基础顶端瞬时风荷载时程曲线



(b) 塔筒顶端瞬时风荷载时程曲线

图 3 瞬时风荷载时程曲线

Fig. 3 Time history curve of instantaneous wind load

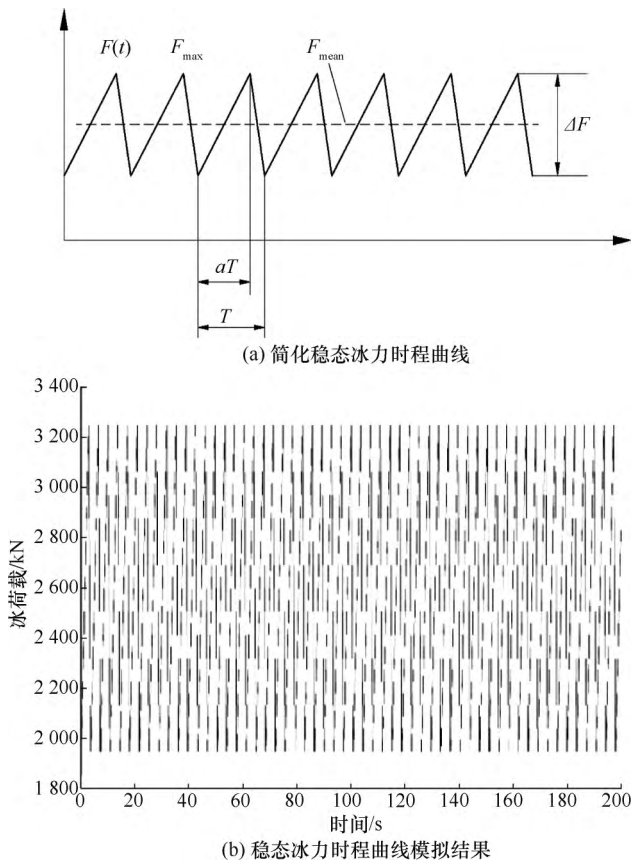


图 4 稳态冰力时程曲线

Fig. 4 The time-history curve of steady-state ice force

加载阶段系数, 通常选取 0.6~0.9。图 4(b) 所示的冰力时程施加在结构水面线处的节点上。

### 2.3 波浪荷载模拟和施加

波浪理论选 ANSYS 软件中 WATER TABLE 的 KWAVE 设置推荐的 Stokes 五阶波理论。波浪荷载的施加是通过定义 PIPE59 单元的实常数以及定义 WATER TABLE 中波浪理论的序号、水深、海水密度、波高、波周期、波浪相位角完成的。

海流与波浪相比更为稳定, 其流动过程中加速度可不考虑。海流荷载施加是通过定义 WATER TABLE 中海流速度以及波流耦合作用方式序号完成的。

模拟的规则波荷载和恒定流荷载施加在结构泥面以上部分。

## 3 静力校核

### 3.1 荷载组合及作用方向

参考《海上风力机设计要求》(IEC 61400—3)<sup>[16]</sup>规范和挪威船级社规范<sup>[1]</sup>, 在考虑风、波、流和冰荷载联合作用时, 假定这些环境荷载作用方向相同且均为荷载联合作用方向。三脚架式风电基础结构为

120°对称结构, 通过计算, 得出静力校核时最不利的荷载联合作用方向为的 0°方向, 如图 5 所示。

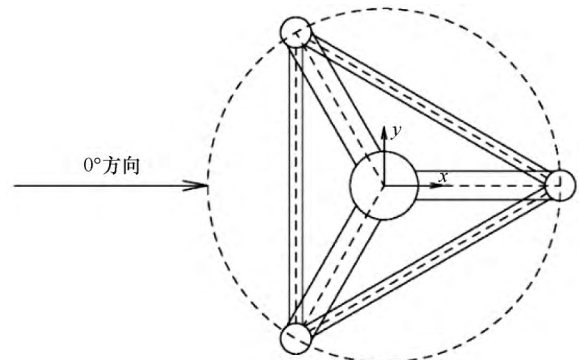


图 5 最不利的荷载联合作用方向

Fig. 5 The direction of the most unfavorable combined action of loads

本文采用的风、浪、流、冰荷载参数, 如表 2 所列。对海上风电整体结构进行静力分析的主要目的是保证整体结构强度和刚度在安全范围内, 静力分析的两种荷载联合作用如下:

- (1) 风荷载(风机荷载+塔筒风荷载)+波浪荷载+流荷载。
- (2) 风荷载(风机荷载+塔筒风荷载)+海冰荷载+流荷载。

表 2 本文采用的风、浪、流、冰荷载条件

Table 2 The load conditions of wind, wave, current and ice are adopted in this paper

风	10 m 高度处风速 10 min 平均风速: $U_{10, 50\text{-yr}} = 35.4 \text{ m/s}$
波浪	有效波高: $H_s, 50\text{-yr} = 4.7 \text{ m}$ , $T_s = 10 \text{ s}$
海流	底部流速 $v_{\text{bottom}, 5\text{-yr}} = 0.85 \text{ m/s}$ , 中部流速 $v_{\text{middle}, 5\text{-yr}} = 1.05 \text{ m/s}$ , 表面流速 $v_{\text{surface}, 5\text{-yr}} = 1.25 \text{ m/s}$
海冰	冰厚 $H_{\text{ice}, 50\text{-yr}} = 0.38 \text{ m}$ , 冰的单轴压缩强度 $\sigma_c = 2 \text{ MPa}$ , 弯曲强度 $\sigma_f = 700 \text{ kPa}$

### 3.2 校核结果

结构的静力计算结果如图 6 和图 7 所示。

从图 6 可以看出, 在风、冰、流荷载联合作用下, 结构三脚架基础出现最大等效力, 为 143 MPa, 塔筒顶端位移最大, 为 0.72 m, 均大于风、浪、流荷载联合作用的情况(见图 7, 最大等效力为 102 MPa, 塔筒顶端位移 0.67 m)。可见在冰区风电基础结构设计时海冰荷载不容忽视。

三脚架基础的静力校核采用许用应力法, 以验证结构的强度是否符合要求。验证过程按下式进行<sup>[9]</sup>

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (5)$$

$$[\sigma] = 0.8 \times \sigma_s \quad (6)$$

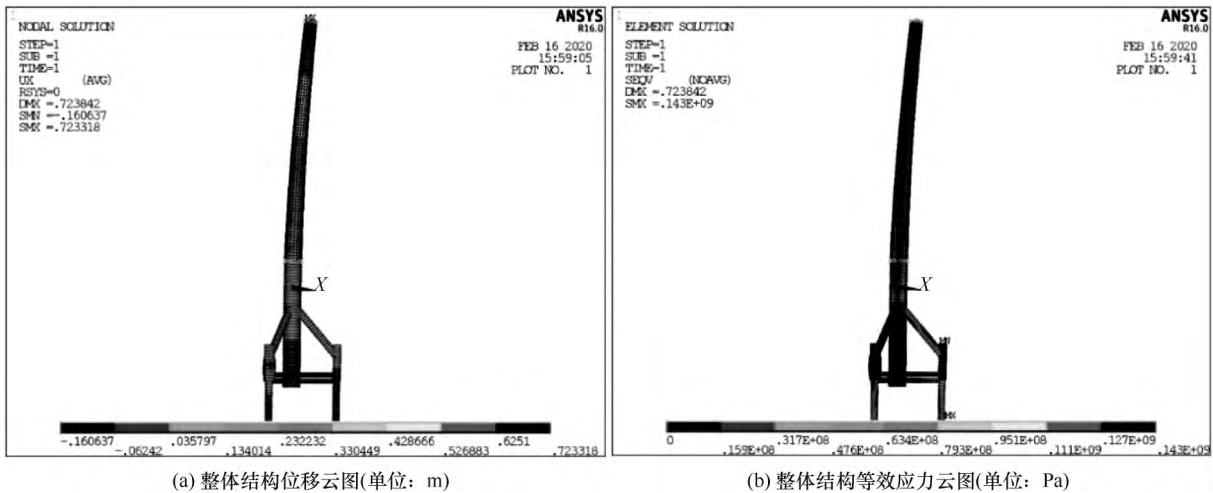


图 6 风、冰、流荷载联合作用静力分析结果

Fig. 6 Diagram of static analysis results under combined action of wind , ice and flow loads

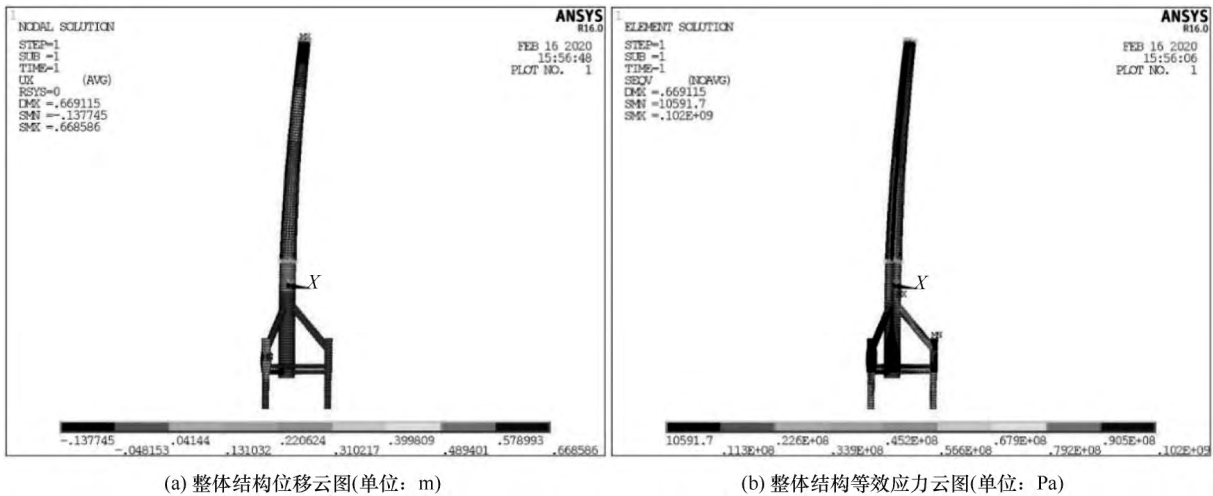


图 7 风、浪、流荷载联合作用静力分析结果

Fig. 7 Diagram of static analysis results under combined action of wind , wave and flow loads

式中,  $\sigma_{max}$  为荷载作用下结构的应力极值 (MPa);  $[\sigma]$  为结构所用材料的应力容许值 (MPa);  $\sigma_s$  为材料的屈服强度 (MPa)。

计算可知本文三脚架结构所用 DH36 钢材的许用应力为 288 MPa, 大于结构在荷载联合作用下的等效应力极值 143 MPa, 所以该海上风电三脚架基础的强度符合要求。

塔筒顶部位移按照悬臂梁结构刚度的校核方法进行校核<sup>[16]</sup>, 塔筒顶部的位移与塔筒高度的比值应限制在 0.25% ~ 1% 范围内。塔筒顶端位移极值为 0.72 m, 悬臂长度取塔筒在竖直方向上的尺寸 80 m, 则塔顶位移极值为悬臂长的 0.9%, 在要求范围内, 故塔筒的刚度符合要求。

## 4 动力响应分析







### 4.1 模态分析

对于海上风电基础结构而言, 模态分析是验证结构自振频率是否与风机的工作频率范围发生重叠的方法, 从而可以有效地避免结构产生共振现象。结构前 6 阶模态的振型及相应的结构自振频率如表 3 所列。

本文考虑的环境荷载为风、波浪、海冰和流荷载, 其中海冰荷载作用于立柱的水面线处, 其频率范围为 0~1Hz, 结构的固有频率在此范围内, 因而在特定的冰况条件下结构会发生稳态振动。风机工作频率等于其 1 倍与 3 倍转子频率范围, 根据风机转子起转频率 (0.115Hz) 和额定工作频率 (0.202Hz) 计算

表3 三脚架基础海上风电结构前6阶模态的自振频率及振型

Table 3 Natural frequencies and vibration modes of the first six modal of offshore wind turbine structure based on tripod

阶数	1	2	3	4	5	6
自振频率/Hz	0.285	0.285	1.167	1.167	2.059	2.521
振型						

出工作频率为  $[0.115, 0.202]$  Hz 和  $[0.345, 0.606]$  Hz。为保证一定的可靠度, 结构固有频率应该远离荷载频率 5% 以上<sup>[18]</sup>, 三脚架基础结构的各阶频率均避开  $[0.109, 0.212]$  Hz 和  $[0.327, 0.662]$  Hz, 因此不会发生共振现象。

#### 4.2 动力响应分析

海上风电结构的塔筒因其支承风机的正常运行需要相对稳定的条件, 所以其顶端动力响应的大小必须控制在一定范围以保证结构的安全和发电功能的稳定<sup>[19]</sup>。三脚架基础顶端与塔筒底相连, 其在动力荷载作用下振动的剧烈程度直接会影响塔筒的稳定性。因此, 本文重点关注两种环境荷载联合作用下塔筒顶部和三脚架基础顶部的位移与加速度响应。

本文通过 ANSYS 软件对结构进行瞬态响应分析, 虽是根据实际情况进行的数值模拟, 但由于风、浪、流、冰荷载具有随机性, 模拟结果与实际有些许差异, 特别是在前期荷载刚加载时, 结构响应很大, 与实际情况不符, 实际上对于风电

结构来说, 环境荷载作用是一个持续且相对稳定的过程, 不存在荷载突然施加导致结构响应突然增大这种情况, 但总体来看, 在加载后大概 40~70 s 之后, 结

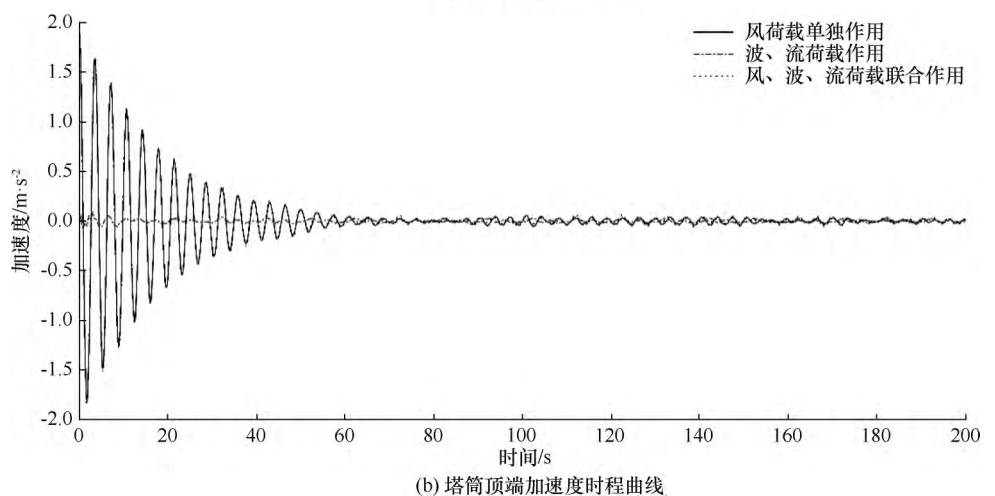
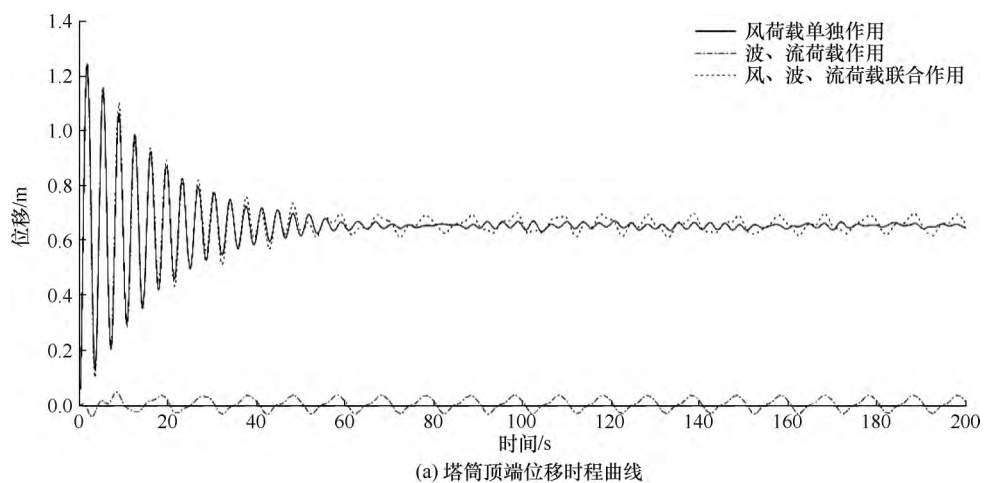


图8 塔筒顶端位移和加速度时程曲线

Fig. 8 The time history curves of displacement and acceleration at the top of the tower

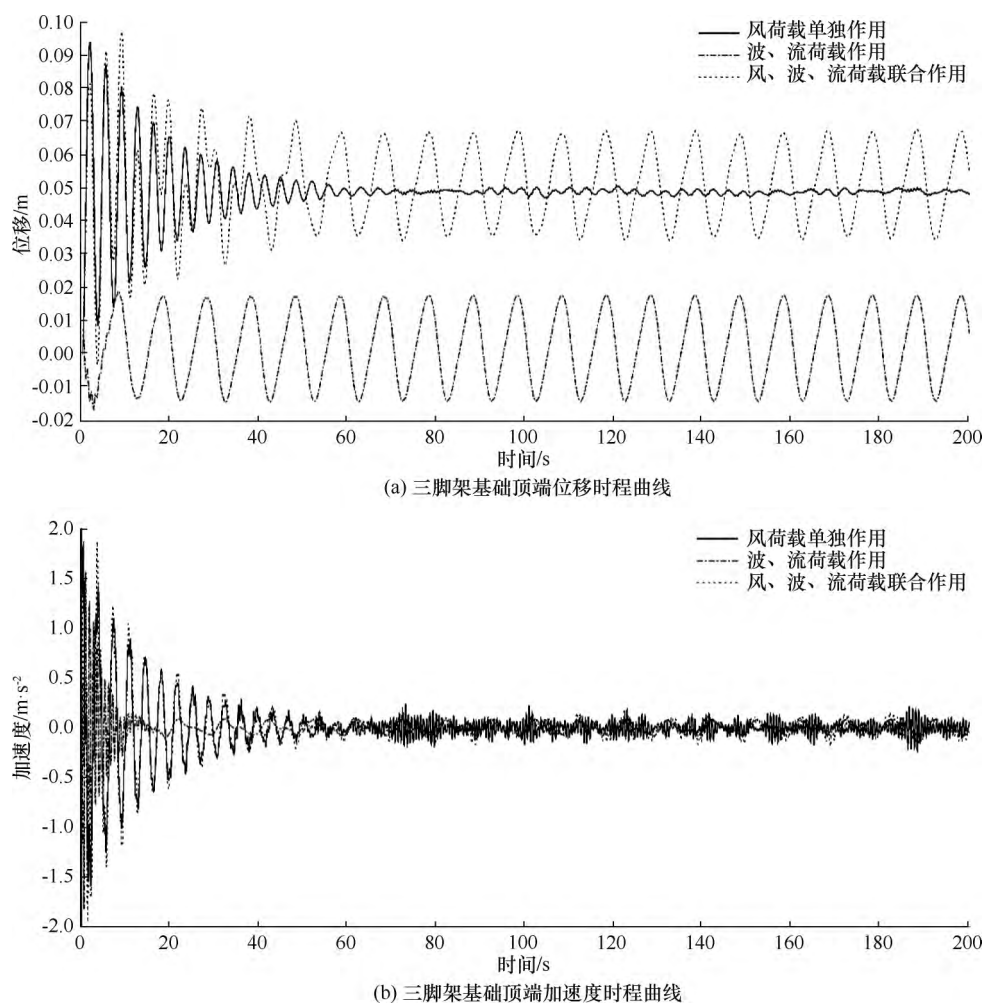


图9 三脚架基础顶端位移和加速度时程曲线

Fig. 9 The time history curves of displacement and acceleration at the top of tripod foundation

构进入稳态振动状态,此时结构响应符合实际情况。

#### 4.2.1 风、波、流荷载联合作用

结构响应在风、波、流荷载联合作用下与风荷载和波、流荷载耦合作用下的差异如图8和图9所示。

从图8时程曲线可以看出,约在60s塔筒顶端响应开始稳态波动,较好的反映实际情况。在风、波、流荷载联合作用下,塔筒顶的动力响应最大,位移在0.61~0.69m范围内稳定波动,加速度在 $-0.036\sim 0.057\text{ m/s}^2$ 范围内稳定波动,这与风荷载单独作用时的规律一致,仅数值略大,说明风荷载主导塔筒顶端动力响应。图9显示了三脚架基础顶部的动力响应规律:约在50s时三脚架基础顶端位移开始在0.036~0.067m范围内稳定波动,可以看出在风、波、流荷载联合作用下三脚架基础顶部的位移几乎是风荷载和波、流荷载分别单独作用下的位移的叠加;约在43s时三脚架基础顶端加速度开始在 $-0.036\sim 0.057\text{ m/s}^2$ 范围内稳定波动,分析看出稳定波动阶段

的三脚架基础顶端在风、波、流荷载联合作用下的加速度幅值小于这个阶段的风荷载和波、流荷载作用下的加速度的叠加。

#### 4.2.2 风、冰、流荷载联合作用

结构响应在风、冰、流荷载联合作用下与风荷载和冰荷载分别单独作用下的差异如图10和图11所示。

根据图10可知,塔筒顶端在风、冰、流荷载联合作用下的位移和加速度响应规律相似,约70s开始稳态振动,位移波动范围是0.50~0.94m,加速度波动范围是 $-0.63\sim 0.68\text{ m/s}^2$ 。塔筒顶端的动力响应主要由冰荷载控制达到稳态振动状态,从数值上来看,塔筒顶端在风、冰、流荷载联合作用下动力响应为荷载单独作用下的叠加。根据图11可知,三脚架基础顶端在风、冰、流荷载联合作用下的位移响应规律与塔筒顶端位移响应规律

相似,约60s开始稳态振动,位移波动范围是0.062~0.104m;其加速度响应规律与位移响应规律有所区别,约40s加速度开始稳态响应,波动范围是 $-0.199\sim 0.154\text{ m/s}^2$ ,值大于冰荷载单独作用下的加速度响应。

## 5 结语

海上风电结构在复杂的海洋环境中承受着多种环境荷载的不断作用,结构会因此产生剧烈的动力响应,研究其动力特性对实际工程风电结构安全设计具有重要意义。本文采用ANSYS有限元软件建立三脚架基础海上风电整体结构模型并进行荷载(风、波、流和风、冰、流)联合作用下的静力校核,进一步探究其动力响应的特性及规律。主要结论如下。

(1) 静力分析结果表明,在风、冰、流荷载联合作用下结构的最大等效应力和塔筒位移均大于风、波、流荷载联合的情况。三脚架基础强度和塔筒刚

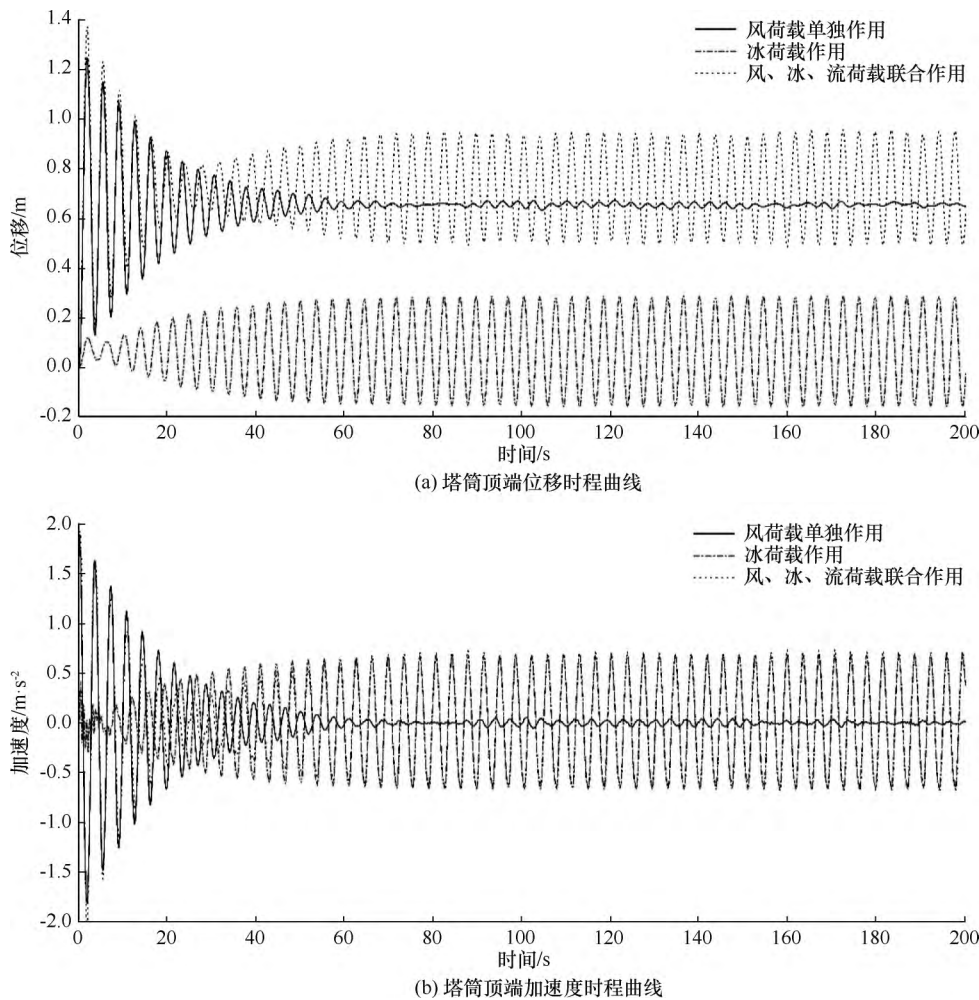


图 10 塔筒顶端位移和加速度时程曲线

Fig. 10 The time history curves of displacement and acceleration at the top of the tower

度经校核均满足要求。其中, 本文海上风电三脚架基础在最不利的荷载组合作用下的最大等效应力发生在斜撑与中间立柱的连接处, 设计时应着重关注。

(2) 模态分析结果表明, 三脚架基础结构的一、二阶自振频率均为 0.285 Hz, 在所选风机允许的频率范围内, 可以保证整体结构不会与风机转动发生共振。

(3) 动力响应分析结果表明, 在环境荷载联合作用下, 对海上风电结构塔筒顶端和三脚架基础顶端动力响应影响最大的是风、冰荷载, 波、流荷载对于结构动力响应的影响较小, 因此风、冰荷载对于冰区海上风电三脚架基础的动力计算起着重要作用。

(4) 数值模拟过程荷载相当于突然施加, 导致结构动力响应突然增大, 这是不符合实际的, 随着时间的推移, 结构响应进入稳态波动响应阶段, 此时可以较好的反映实际工程情况。

(5) 综合结构稳态波动状态的动力响应来看, 风

荷载主导控制风、波、流荷载联合作用下结构响应的稳态波动过程, 冰荷载主导控制风、冰、流荷载联合作用下结构的稳态振动过程; 环境荷载联合作用下塔筒顶端呈现的位移和加速度响应均远大于三脚架基础顶端, 环境荷载联合作用下结构动力响应是环境荷载单独作用下动力响应叠加的结果。

研究成果给出了三脚架基础海上风电结构在环境荷载联合作用下的动力响应规律, 为实际工程中风电结构设计提供了理论依据。但本文重点关注的是海上风电三脚架基础结构的位移与加速度响应规律, 后续研究工作可以关注结构的振动控制, 也可以对结构关键位置的应力特征进行详细讨论, 并据此对结构的疲劳寿命等方面展开相关研究; 此外本文海上风电三脚架基础的桩基部分采用六倍桩径嵌固的方法进行简化的建模研究, 下一步可以通过建立完整的桩基模型, 探究荷载联合作用对桩基基础的影响以及桩土相互作用对于上部结构动力响应的影响。

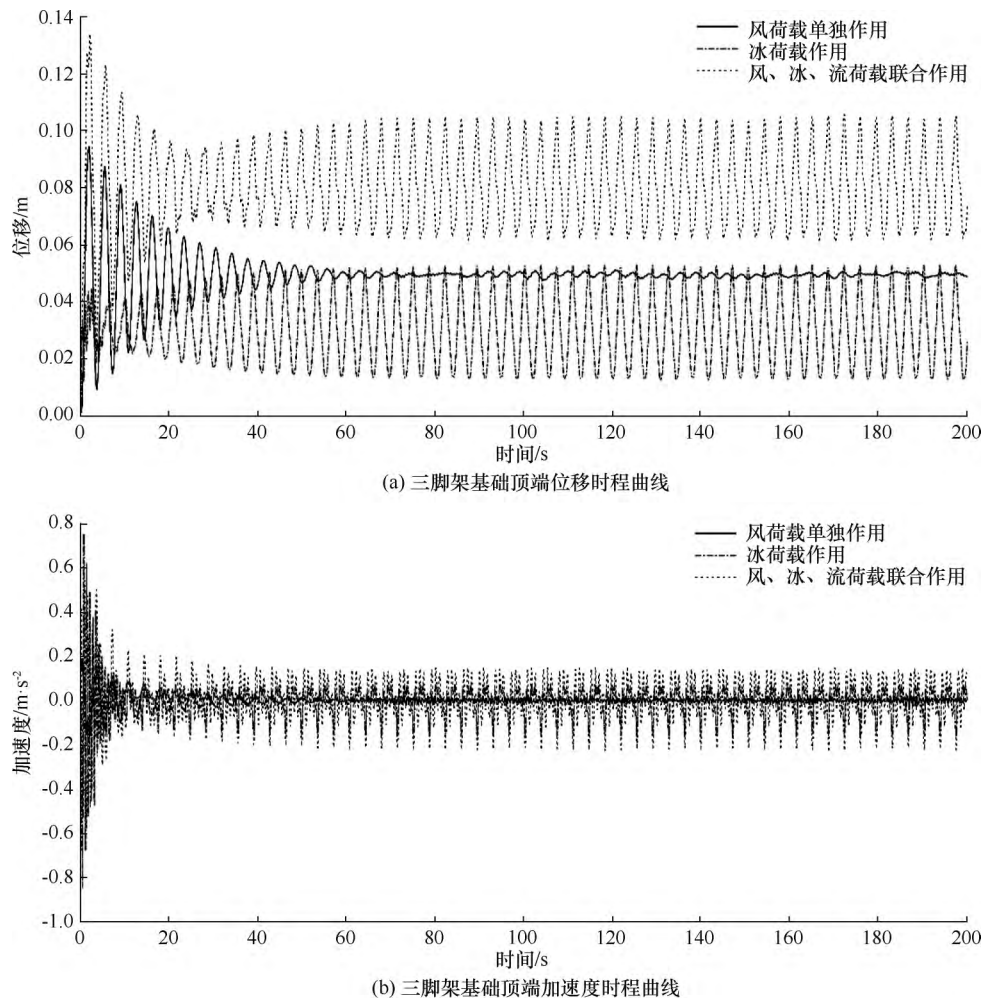


图 11 三脚架基础顶端位移和加速度时程曲线

Fig. 11 The time history curves of displacement and acceleration at the top of tripod foundation

参考文献(References):

[1] 娄春娟. 近海简易风电基础结构设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
LOU Chunjuan. Study on the design of simple offshore wind turbine foundation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[2] 张毅. 冰区海上风机支撑结构疲劳评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.  
ZHANG Yi. The fatigue assessment of support structures for the offshore wind turbine in the ice region[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[3] 李伟, 郑永明, 陆飞, 等. 海上风电基础结构动力分析[J]. 海洋通报, 2012, 31: 67-73.  
LI Wei, ZHENG Yongming, LU Fei, et al. Dynamic analysis of foundational structure for offshore wind turbine[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31: 67-73.

[4] 沙鑫. 海上风电机组四桩导管架支撑结构的动力响应分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
SHA Xin. Dynamic response analysis of offshore wind turbines' support structure with four piles[D]. Qingdao: Qingdao Ocean University, 2014.

[5] CHENG P W. A reliability based design methodology for extreme responses of offshore wind turbines[D]. Delft: Technische University Delft, 2002.

[6] ALATI N, FAILLA G, ARENA F. Seismic analysis of offshore wind turbines on bottom-fixed support structures[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical Engineering Sciences, 2015, 373(2035): 20140086.

[7] ZHANG J, KANG W H, ZHANG C, et al. Reliability based analysis and design of a tripod offshore wind turbine structure assuring serviceability performance[J]. Polish Maritime Research, 2018, 25(4): 139-148.

[8] 中国船级社. 海上移动平台入级与建造规范: CCS—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Code for classification and Construction of offshore mobile platforms: CCS—2005[S]. Beijing: China communication press, 2005.

[9] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
China Academy of Building Sciences. Load code for the design of building structures: GB 50009—2011[S]. Beijing: China Building

- Industry Press, 2012.
- [10] 芮晓明,柳亦兵,马志勇. 风力发电机组设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.  
RUI Xiaoming, LIU Yibing, MA Zhiyong. Design of wind turbine [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [11] API. Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms—Working stress design[S]. American Petroleum Institute, 2014.
- [12] 孙振. 建筑结构风荷载的计算机模拟与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
SUN Zhen. Computer simulation and Analysis of wind loading of structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [13] API-RP-2N. Planning, designing, constructing structures pipelines for Arctic conditions[S]. American Petroleum Institute, 2015.
- [14] KÄRNÄ T, IZUMIYAMA K, YUE Q, et al. An upper bound model for self-excited vibrations[C]//YUE Qianjin, JI Shunying. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Dalian: International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2007: 177-189.
- [15] International Electrotechnical Commission (IEC). Wind turbines-Part 3: Design requirements for offshore wind turbines: IEC-61400-3[S]. International Electrotechnical Commission, 2009.
- [16] NICHOLSON J C. Design of wind turbine tower and foundation systems: optimization approach[D]. Iowa: University of Iowa, 2011.
- [17] LLOYD G. Guideline for the certification of offshore wind turbines[S]. Hamburg: Hamburg Germany, 2010.
- [18] FEYZOLLAHZADEH M, MAHMOODI M, YADAVAR-NIKRAVESH S, et al. Wind load response of offshore wind turbine towers with fixed monopile platform[J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 2016, 158: 122-138.

(责任编辑 郭利娜)