2021 年 3 月

冰工程中的关键力学问题

基于 DEM-FEM 耦合方法的海上风机结构 冰激振动分析¹⁾

杨冬宝* 高俊松* 刘建平* 宋 础** 季顺迎*.2)

*(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁大连 116023) †(中国三峡新能源 (集团)股份有限公司,北京 100053) **(上海勘测设计研究院有限公司,上海 200434)

摘要 冰载荷是海上风机在寒区安全运行的重要影响因素之一,由其引发的冰激振动给风机结构带来了严重的 危害.本文通过离散元 (discrete element method, DEM)-有限元 (finite element method, FEM) 耦合方法建立了寒 区单桩式风机结构的冰激振动模型.采用具有粘结-破碎性能的球体离散单元描述平整海冰损伤破坏行为,采 用梁单元和三角形平板壳单元构造带有抗冰锥体的单桩式风机有限元模型.采用 DEM-FEM 耦合方法模拟不同 冰速、冰厚条件下单桩式风机与平整冰相互作用过程,并且与 IEC 规范和 ISO 标准经验公式对比验证该耦合模 型计算冰载荷的准确性.对比风机塔筒顶端和基础顶端的位移和加速度响应时程,定性地给出风机结构不同部 位振动响应行为差异性.风机不同部位动力特性差异原因为风机结构独特结构特点:下部为大刚度桩基和上部 为高柔度塔筒,使其动力特征表现为主从式结构特性."主-从式结构"特征使得结构在复杂的冰载荷作用下,风 机塔筒 (子结构)和桩基 (主结构)表现为不同的响应行为,风机不同部位振动周期和加速度谱两者出现差异.本 文研究成果为海上风机抗冰设计和疲劳分析提供了有益参考.

关键词 海冰,单桩式海上风机,冰载荷,冰激振动,DEM-FEM 耦合方法

中图分类号: P751, P731.15 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-20-386

ANALYSIS OF ICE-INDUCTED STRUCTURE VIBRATION OF OFFSHORE WIND TURBINES BASED ON DEM-FEM COUPLED METHOD¹⁾

Yang Dongbao* Gao Junsong[†] Liu Jianping[†] Song Chu^{**} Ji Shunying^{*,2)}

*(State Key Laboratory of Structure Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China) [†](China Three Gorges Renewables (Group) Co.,Ltd., Beijing 100053, China)

**(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200434, China)

Abstract The ice load is one of the most important factors that cannot be ignored for offshore wind turbines (OWTs) in cold regions. The ice-induced vibrations (IIVs) can bring serious fatigue and damage to the OWTs structure. In this paper, a coupling method of the discrete element method (DEM) and the finite element method (FEM) is adopted to establish the IIVs model of monopile-type OWTs. The breakage and failure process of level ice are simulated with the spherical

²⁰²⁰⁻¹¹⁻¹⁵ 收稿, 2021-01-11 录用, 2021-01-12 网络版发表.

¹⁾ 国家重点研发计划重点专项 (2016YFC1401505), 国家自然科学基金 (51639004, 41576179) 和中国长江三峡集团有限公司科研项目 (202003042) 资助.

²⁾ 季顺迎,教授,主要研究方向:颗粒材料计算力学及寒区海洋工程. E-mail: jisy@dlut.edu.cn

引用格式:杨冬宝,高俊松,刘建平,宋础,季顺迎. 基于 DEM-FEM 耦合方法的海上风机结构冰激振动分析.力学学报,2021,53(3):682-692 Yang Dongbao, Gao Junsong, Liu Jianping, Song Chu, Ji Shunying. Analysis of ice-inducted structure vibration of offshore wind turbines based on DEM-FEM coupled method. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(3): 682-692

DEM with bonding-breaking effect, and the finite element model of monopile-type OWTs is constructed by the beam element and triangular plate shell element. The DEM-FEM coupled method is adopted to simulate the interaction progress between monopile-type OWTs and level ice under different ice velocity and ice thickness conditions. The accuracy of ice load calculated by the DEM-FEM coupled method is verified by comparing with the empirical formula of IEC (International Electrotechnical Commission) and ISO (the International Organization for Standardization). By comparing the displacements and the acceleration of the top of the wind turbine tower and the top of the foundation, the dynamic response characteristic of the OWTs is qualitatively analyzed. The reason for the difference of dynamic characteristics in different parts of OWTs is structural model characteristic of OWTs: the lower part is a large stiffness pile foundation and the upper part is a high flexibility tower, which makes its dynamic characteristic show the characteristics of the main and subordinate structure. The characteristics of "Main-Subordinate structure" make the tower (subordinate) and pile foundation (main) show different response behaviors under complex ice load, and the vibration period and acceleration power spectrum density (PSD) of different parts of OWTs in cold regions.

Key words sea ice, monopile-type offshore wind turbines, ice load, ice-inducted vibrations, DEM-FEM coupled method

引 言

海上风能是最具有发展前景的可再生资源之一. 我国漫长的海岸线和丰富的海风资源,为发展海上 风电提供了有力的条件.虽然我国海上风电发展起 步晚,但是自 2018 年以来,我国海上风电新增装机 量已经超过英国和德国,成为全球最大的海上风电 发展市场.

传统的海上风机设计主要考虑空气动力、水利 环境和抗震设计等外界因素^[1-2],但是对于我国渤海 及黄海北部寒区海域的风机设计,海冰也是无法忽 略的重要因素之一.虽然在一些寒区风机抗冰设计 中已经采用极端静冰载荷校核风机结构抗冰性能, 但是大量现场观测和理论研究表明,由海冰引起的 冰激振动对海洋结构和设备的危害远远超过极端静 载荷下结构整体安全问题^[3].此外,现场测量和模型 实验表明直立或锥体基础的海洋平台结构都会发生 强烈的冰激振动,相比于锥体结构的随机振动,直立 结构的稳态振动对于结构的危害更为严重^[4-5].

海上风机结构主要分为适用于浅水海域的基础固定式风机和适用于较深海域的浮式风机^[6].在各种风机结构中,单桩式风机是目前国内外应用最为广泛、研究最为集中的风机结构.对于风机与海冰的相互作用,其研究工作最早开始于20世纪80年代丹麦、芬兰和挪威等北欧国家^[7].通过一系列单桩风机基础与海冰相互作用的模型试验探讨了不同风机基础结构模型的动力学特性和冰载荷

特点[8-9]. 近些年来, 随着数值模拟技术的快速发 展, Wang^[10]采用 Karna 冰力谱模型分析了冰载荷与 风载荷对于风机疲劳的影响,得到冰载荷对于风 机结构的振动响应和疲劳损伤的影响大于风载荷 所造成的影响的结论; Shi 等[11]将半经验海冰-结 构作用模型与 HAWC2 程序相耦合研究了具有抗 冰锥的单桩式风机在不同冰速、冰厚工况下风机 结构的动力响应. 此外, 美国能源部国家可再生 能源实验室 (NREL) 的 FAST 风机软件也引入了基 于 Määttänen-Blenkar 海冰模型 IceDyn 模块计算风机 的冰载荷[12].相比于国外,国内对于风机研究主要通 过数值模拟和室内模型试验进行研究[13]. 天津大学 在低温冰水池对于不同直径单桩风机基础开展模型 试验,重点验证各种冰载荷规范对于单桩风机适用 性[7]. 一些国内学者基于风力谱和冰力函数也对各种 固定式风机进行振动时域响应分析[14-16].

基于经典的海冰力学模型或冰力函数研究海冰 与风机结构的相互作用更多侧重于结构的响应,而 对海冰破坏方式给予了大量的假设.近年来,基于 非连续力学的离散元方法被广泛地应用于海冰数值 模拟中来有效模拟海冰破碎现象^[17-18],其中采用粘 结-破碎特性的球体离散单元可以合理准确地模拟 海冰与复杂海洋平台结构、船体结构等相互作用过 程^[19-20].风机结构在海冰激励下复杂的动力学响应 计算可以采用有限元方法计算,因此基于计算参数 传递的 DEM-FEM 界面耦合模型^[21]可计算单桩式风 机结构的冰激振动.

报

为此,本文采用 DEM-FEM 耦合方法建立海冰 与单桩式风机的耦合模型,探讨不同冰速、冰厚下 单桩式风机的冰载荷及风机轮毂和下部桩基的冰激 振动响应特征.

1 单桩式风机冰激振动的数值方法

在对风机整体结构的冰激振动特性模拟中,风 机采用有限元方法进行动力学分析,海冰采用离散 元方法模拟,两者通过计算参数传递实现耦合分析.

1.1 海冰离散元方法

本文主要研究平整冰与风机相互作用过程, 其中将平整冰模型离散为具有粘结--破碎特性的等 直径球体单元.为合理地模拟实际海域内海冰的边 界条件,对 DEM 海冰模型的两侧边界的球形单元 给予 y 和 z 方向上固定的位移约束,后侧给予恒定 的流速,如图 1(a) 所示.颗粒之间采用平行粘结模 型^[22]传递单元间的作用力,如图 1(b) 所示.平行粘



结模型之间的最大拉应力和最大剪应力可以通过经 典梁的拉伸、扭转和弯曲理论计算,即

$$\sigma_{\max} = \frac{-F_{n}}{A} + \frac{|M_{s}|}{I}R \tag{1a}$$

$$\tau_{\max} = \frac{|F_s|}{A} + \frac{|M_n|}{J}R \tag{1b}$$

式中, *F*_n 和 *F*_s 为粘结颗粒之间的法向和切向力; *M*_n 和 *M*_s 为粘结颗粒的法向和切向力矩; *A*, *R*, *J* 和 *I* 分别为粘结颗粒之间的粘结面积、等效粘结半 径、极惯性矩和惯性矩.

海冰离散元方法通过单元间的粘结失效模拟 海冰内部裂纹的生成和扩展,其中采用拉剪分区 断裂准则对颗粒粘结失效进行判断^[23],如图2所 示.当两个粘结颗粒之间的最大拉应力 σ_{max} 或剪切 应力 τ_{max} 达到材料拉伸破坏强度 σ^t 或剪切破坏强 度 τ^t 时,颗粒间的粘结失效海冰发生破坏.这里,粘 结颗粒间的拉伸破坏强度 σ^t 和剪切破坏强度 τ^t 表 示为

$$\sigma^{t} = \sigma_{b}^{n} \tag{2}$$

$$\tau^{t} = \sigma_{b}^{s} + \mu_{b}\sigma_{max} \tag{3}$$

式中, σ_b^n 和 σ_b^s 分别表示为法向粘结强度和切向粘 结强度,其中 $\sigma_b^n/\sigma_b^s = 1$; μ_b 为内摩擦系数,则 $\mu_b = \tan \varphi$, φ 为内摩擦角.





海冰离散元参数 σ_b 和 μ_b 的选取直接影响海冰 宏观物理力学性质. 通过 DEM 模拟海冰的单轴压缩 试验和三点弯曲试验,可以得到海冰宏观强度与颗

685

粒直径 D、粘结强度 σ_b 、颗粒间摩擦系数 μ_b 等离散 元微观参数的关系,其可写作^[24-25]

$$\sigma_{\rm b} = \sigma_{\rm f} / (1.77 - 1.81 {\rm e}^{-\frac{L/D}{4.78}}) \tag{4}$$

$$\mu_{\rm b} = 0.23\sigma_{\rm c}/\sigma_{\rm f} - 0.5 \tag{5}$$

式中, $\sigma_{\rm f}$ 和 $\sigma_{\rm c}$ 为海冰的弯曲强度和压缩强度; 尺 寸 L 可视为海冰的厚度, 则 L/D 为平整冰中单元 层数.

1.2 单桩式风机结构的有限元模型

建立带有抗冰锥体的单桩式风机的有限元模型,该模型主要由桩基、抗冰锥、塔筒和轮毂叶片4部分组成,如图3(a)所示.为保证单桩式风机结构几何形状和整体结构振动响应的真实性,对风机的桩基和上部轮毂叶片作了适当的简化.风机桩基和塔筒等主体部分由梁单元构造;叶片由三角形单元构造,叶片单元仅为保证结构模型几何完整性不做动力学计算.风机抗冰锥体采用三角形平板壳单元进行有限元分析计算,其结构模型如图3(b)所示.综上所述,本文采用的单桩式风机模型主要由梁-壳组合单元构造,共有1229个单元节点和1933个单元,风机各部分详细信息列于表1中.



(a) 风机有限元模型(a) Finite element model of wind turbine



表1 风机结构有限元模型的主要参数

Table 1 Main parameters of finite element model

Informatio	n of C	OWTs

Structure	Type of element	Number
tower	beam element	53
pile foundation	beam element	20
cone	triangular shell element	1406
blade of OWTs	triangular element	374

为重点考虑风机在海冰作用下的振动特性,忽略空气动力载荷和水动力载荷,并且采用 6 倍桩径法建立风机桩-土系统约束.此外风机上部的轮毂叶片的原型质量为 213.7 t,简化为一个集中质量单元.表 2 列出简化后模型的前 5 阶自振频率.

表 2 单桩式风机振动模态

Table 2 Vibration mode of monopile-type wind turbine

Model	1	2	3	4	5
natural frequency/Hz	0.290	0.290	1.447	1.447	3.972

采用 Newmark 隐式积分求解算法对于风机动力 学方程求解,结构的动力学方程为

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{\ddot{u}}_{\mathrm{t}} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{\dot{u}}_{\mathrm{t}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u}_{\mathrm{t}} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{ice}} \tag{6}$$

式中, \dot{u}_t , \dot{u}_t 和 u_t 分别为t时刻结构的加速度、速 度和位移向量;M,C和K分别为结构的整体的质

报

量、阻尼和刚度矩阵; *F*_{ice} 为结 *t* 时刻受到的冰载 荷. 其中质量矩阵 *M* 采用集中矩阵, 阻尼矩阵 *C* 采 用 Rayleigh 阻尼形式, 即

$$\boldsymbol{C} = \alpha \boldsymbol{M} + \beta \boldsymbol{K} \tag{7}$$

式中,参数 α 和 β 通过结构的模态阻尼比和固有频率计算得到,即 α = 0.171, β = 0.014 6.

1.3 DEM-FEM 耦合模型

本文所采用的 DEM-FEM 耦合算法是基于原 耦合异步方法的基础上^[21].通过 CUDA C++语言 建立 CPU-GPU 协同处理并行计算架构的 DEM-FEM 界面耦合模型.基于界面参数传递的 DEM-FEM 耦 合算法在有限元和离散元计算中需要二者进行参数 信息传递达到强耦合的效果.在有限元计算中,需要 实时获得离散单元与结构之间的接触力、接触单元 编号和局部接触点等信息;同时在离散元计算中, 又需要更新结构的坐标和单元速度信息,如图 4 所 示.但是,GPU 设备端的 DEM 并行计算所得到载荷 信息结果是随机分配在各个线程中,使得界面之间 参数传递效率低下.本文采用 CUDA 的 Thrust 函数 中 inclusive_scan 和 sort_by key 函数对界面之间的参 数进行高效的基数排序^[21],实现离散元与有限元之 间高效的参数传递.



DEM-FEM

2 单桩式风机冰载荷分析及验证

2.1 风机冰载荷分析

海洋风机的冰载荷和冰激振动与海冰的厚度 和速度有着密切关系^[12].针对 50年一遇海冰厚度 为 0.374m,平均冰速为 0.3 m/s^[15,26],本文依照冰速 和冰厚两个变量划分 20种工况,具体参数列于表 3. 此外,在流体动力学方面,考虑水对海冰的拖曳 力 *F*_d 和浮力 *F*_b,表示为

$$\boldsymbol{F}_{\rm b} = -\rho_{\rm w}gV_{\rm sub}^i\boldsymbol{z} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{F}_{\rm d} = -\frac{1}{2} C_{\rm d} \rho_{\rm w} V_{\rm sub}^i(\boldsymbol{\nu}_i - \boldsymbol{\nu}_{\rm w}) |\boldsymbol{\nu}_{\rm i} - \boldsymbol{\nu}_{\rm w}| \qquad (9)$$

式中, ρ_w 为海水密度; V_{sub}^i 为单元 *i* 浸入水体积; C_d 为流对冰的拖曳系数; v_i 和 v_w 为海冰和水的速度; *z* 为向上单位矢量.

表 3 数值模拟中的工况划分

Table 3 Working condition of numerical simulation

Definition	Symbol	Value				
ice velocity/($m \cdot s^{-1}$)	v	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
ice thickness/m	h	0.1	0.2	0.3	0	.4

风机冰激振动的相关计算参数列于表 4. 当冰 速 v = 0.2 m/s, 冰厚 h = 0.2 m 时,海冰与风机结构 相互作用过程如图 5 所示.海冰主要与风机锥体上 锥作用发生弯曲破坏,破碎冰排发生攀爬与堆积现 象,由此引发结构的冰激振动.通过 DEM-FEM 耦合 方法模拟平整海冰与单桩式风机结构相互作用,可 以得到风机承受的冰载荷时程,如图 6 所示.该图表 明风机冰载荷呈现很强的随机性与周期性.这是由 于海冰与风机锥体作用发生弯曲破坏时,破碎冰排 与锥体结构会产生周期性的攀爬、堆积和清除,并 且冰排攀爬高度和堆积体积表现随机性.由于冰载 荷随机性的存在,很难与现场实测数据或者经验公 式直接对比,因此本文采取脉冲统计方法^[27],统计 数据峰值的均值作为冰载荷时程的冰载荷表征量.

表 4 DEM-FEM 模拟中计算参数

Table 4 Calculation parameters of DEM-FEM simulation

Definition	Symbol	Value
density of sea ice $/(kg \cdot m^{-3})$	$ ho_{ m ice}$	920
bonding strength/MPa	$\sigma_{ m b}$	0.6
initial ice cover area/m	$a \times b$	40×60
elastic modulus of ice/GPa	$E_{\rm p}$	1.0
friction coefficient	$\mu_{ m b}$	0.2
coefficient of resilience	eb	0.1
current drag coefficient	$c_{\rm d}$	0.06
density of OWTs/(kg·m ⁻³)	$ ho_{ m wind}$	7850
elastic modulus of OWTs/GPa	$E_{\rm wind}$	207
Poisson's ratio of OWTs	μ	0.3
thickness of cone/m	h _{cone}	0.06



图 5 DEM-FEM 模拟海冰与单桩式风机相互作用

Fig. 5 Interaction between ice and monopile-type wind turbine of DEM-FEM simulation



Fig. 6 Time history curve of ice load on the wind turbine

2.2 风机冰载荷验证

为验证模拟结果的准确性,对不同工况下的 冰载荷峰值的均值与 ISO-19906 标准^[28]、IEC6100-3 规范^[29]对比.对于带有锥体的单桩式风机结 构,两个规范分别给出典型锥体结构的静冰力公 式.在 IEC6100-3 规范中,采用三维窄结构的的 Ralstion 公式,其海冰与正锥体相互作用时冰载荷 为^[29]

$$H = A_4 [A_1 \sigma_f h^2 + A_2 \rho_w g h D^2 + A_3 \rho_w g h (D^2 - D_T^2)] \quad (10)$$

式中, A_1 , A_2 , A_3 和 A_4 为无量纲参数, 与海冰与锥体的摩擦系数 μ 和锥角 α 有关; D为水线处锥体直径; D_T 为锥顶直径, 即塔筒直径.

ISO-19906标准作为世界石油天然气工业领域 中寒区海洋结构物设计和评估的行业标准,其基于 海冰塑性理论给出平整冰与锥体结构的水平方向冰 载荷公式[28]

$$H = \frac{\sigma_{\rm f} h^2}{3} \frac{\tan \alpha}{1 - \mu g_{\rm r}} \left[\frac{1 + Y \ln x}{x - 1} + G(x - 1)(x + 2) \right]$$
(11)

式中, Y 取 2.711,
$$G = \frac{\rho_{ice}gD^2}{4\sigma_f h}$$
, $x = 1 + \left(3G + \frac{Y}{2}\right)^{-1/2}$,
 $g_r = \left(\sin\alpha + \frac{\alpha}{\cos\alpha}\right) / \left(\frac{\pi}{2}\sin^2\alpha + 2\mu\alpha\cos\alpha\right)$.

表 5 列出 ISO-19906 标准和 IEC6100-3 规范中 经验公式中相关计算参数的具体取值.

表 5 ISO-19906 标准和 IEC6100-3 规范锥体结构冰载荷 计算参数

 Table 5 Computational parameters of ice load on conical

structure	based	on	codes	ISO	-19906	and	IEC6100-3	3

Definition	Symbol	Value
cone diameter at waterline/m	D	7.75
tower diameter/m	D_{T}	5.5
angle of cone/(°)	α	63
density of sea water/ (kg·m ⁻³)	$ ho_{ m w}$	1030
friction coefficient	μ	0.1
bending strength of sea ice/kPa	$\sigma_{ m f}$	750
accumulation height of sea ice/m	$h_{ m r}$	0
A_1	_	1.95, 1.80, 1.72, 1.65
A_2	_	0.09, 0.125, 0.132, 0.165
A_3	-	0.455
A_4	_	2.2
thickness of sea ice/m	h	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

图 7 所示为 DEM-FEM 耦合方法计算的冰载荷 峰值的均值与 ISO-19906 和 IEC6100-3 经验公式对 比曲线,其中数值模拟统计的冰载荷为单一冰厚下



Fig. 7 Comparison between the peck value of ice load in the DEM-FEM simulation and the empirical formulas

不同冰速 (0.1~0.5 m/s) 冰载荷统计表征量的平均 值,其具体数值列于表 6. 三者计算的冰载荷值与 冰厚的平方成线性的关系. 但是,两个规范公式 和 DEM 模拟计算结果存在一定的差异. ISO-19906 计算的冰载荷结果最大,数值模拟计算的冰载荷最

小,并且模拟得到冰载荷由于海冰冰速变化存在着 差异.这主要因为 DEM-FEM 耦合模型中海冰和结构 的宏细观参数选取与经验公式存在一定差异.此外, 经验公式更多强调其使用的普遍性,因此其表述结 果也相对保守.

表 6	DEM-FEM计算方法与经验公式冰载荷计算结果对比	

Table 6 Calculation results of ice load in the DEM-FEM sim	nulation and the empirical formulas
--	-------------------------------------

Thickness of ice/m	Velocity of ice/ $(m \cdot s^{-1})$						19906	IEC6100.3
The kness of ree/m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	Average value	150-17700	ILC0100-5
0.1	23.79	28.49	36.27	38.25	40.68	33.50	48.29	39.67
0.2	52.20	96.38	96.77	91.81	110.99	89.63	166.63	139.63
0.3	130.14	164.29	183.58	197.90	222.83	179.75	349.94	288.42
0.4	255.49	315.46	355.51	345.99	374.07	329.30	597.00	490.59

3 单桩式风机结构的冰激振动响应

为保证风力涡轮机具备最佳的空气动力特性, 通常要求结构的动力响应水平被控制在一个很小的 水平范围内.因此本文重点关注风电整体结构中基 础顶端和塔筒顶端的动力响应能力和动态响应特性.

3.1 单桩式风机结构的位移响应

图 8 为冰速 0.2 m/s, 冰厚 0.2 m 工况下塔筒顶端 和基础顶端位移响应时程曲线. 从图 8 可以发现, 两 者的振动位移时程曲线存在明显的差异:塔筒顶端 振动周期 *T* = 3.461 s, 基础顶点振动周期 *T* = 0.708 s. 此外,由于冰载荷表现为随机性,使其风机两部分在 每个周期的振动幅值也存在明显差别,塔筒顶部的 振动幅值范围大于基础顶端的振动幅值.

为进一步说明风机塔筒顶端和基础顶端振动周期的差异性,图 9(a) 为风机塔筒顶端位移振动周期与结构一阶自振周期的对比;图 9(b) 为风机基础顶端位移振动周期与结构三阶自振周期的对比.结果







(b) 基础顶端位移响应

(b) Displacement response at top of foundation

图8 单桩式风机位移响应

Fig. 8 Displacement response of monopile-type wind turbine





图 9 风机结构振动周期 Fig. 9 Vibration period of wind turbine



表明不同的风机部分位移振动特性呈现出差异性: 塔筒顶部的振动形式主要以结构的一阶自振周期振动;基础顶端的振动则以结构的三阶自振周期振动. 对于安装有抗冰锥体的单桩式风机结构,其各部分 在海冰作用下表现出不同动态响应行为,其行为与 结构的基础频率密切相关.

为定性描述塔筒顶端和基础顶端在各个工况下的振动幅值,这里引入结构振幅极值 A,表示为

$$A = \max(d_i) - \min(d_i) \tag{12}$$

式中, *d_i* 为第 *i* 个位移响应.图 10 为风机不同部位结构振幅极值 *A* 与冰厚平方的变化关系.对于不同的海冰工况,当冰速一定时,风机各部分结构的振动幅度与冰厚的平方成正相关.

由上述分析可知,塔筒顶端与基础顶端在同一 工况下表现出不同的动力敏感特性,因此定义塔 筒顶端-基础顶端振幅比 y 来描述动力敏感性的差





Fig. 10 Relationship between maximum amplitude and ice thickness

异^[15],γ表示为

$$\gamma = \frac{A_{\text{tower}}}{A_{\text{foundation}}} \tag{13}$$

式中, Atower 为塔筒顶端的振幅极值; Afoundation 为基 础顶端的振幅极值. 图 11 为各个工况下 y 取值的 分布直方图. 可以看出各个工况下,塔筒顶端的振 幅与基础顶端的振幅比存在差异,但是变化范围很 小 (y 平均值为 3.273, 方差为 0.173). 因此,在平整 冰与风机锥体基础作用引起的随机振动过程中,由 海冰输入的能量主要由风机塔筒上部轮毂、叶片所 吸收.通过 y 的分布可以看出,在随机振动模式下, 海冰输入能量在风机上下两部分分配变化很小.





Fig. 11 Average amplitude ratio γ under different working conditions

3.2 单桩式风机结构振动加速度响应

图 12 为冰速 0.2 m/s,冰厚 0.2 m下塔筒顶端和 基础顶端振动加速度响应时程曲线.风机两部分结 构振动均表现出随机性,符合抗冰锥体结构的振动 特点^[4,30].











图 13 为塔筒顶端和基础顶端振动加速度自功 率谱密度曲线.风机两部分结构的频谱分析结果存在 很大差异:塔筒顶端的加速度功率谱主要包含 3 个 频率成分,即 0.293 Hz, 1.465 Hz 和 3.516 Hz,分别 对应表 2 中风机结构的一、三和五阶自振基频;基 础顶端的加速度功率谱则只存在一个频率成分, 即 1.465 Hz,对应结构的三阶自振频率.此外,风机







Fig. 13 PSD of the ice-inducted vibration acceleration of wind turbine

两部分振动加速度的频域结果显示结构振动的主频 主要以结构的三阶自振频率成分为主.

依据单桩式导管架结构现场原型监测结果,平 整冰作用下结构振动加速度响应与冰厚平方和冰速 乘积呈线性关系^[31],即

$$a_{\max} = \beta \cdot h^2 \cdot v \tag{14}$$

式中,β为相关系数; *a*max 为振动加速度峰值. 图 14 为塔顶顶端和基础顶端振动加速度峰值与冰 厚、冰速的关系,风机两部分振动加速度响应峰值 均与冰厚平方和冰速乘积呈线性关系,两者的相关 系数*R*²分别为 0.935, 0.854. 此外,通过对比两条拟 合曲线可知,对于任一工况,风机基础顶端的振动 加速度峰值大于塔筒顶端振动加速度峰值,这说明 结构各部分振动响应存在着差异,距离海冰与结构 相互作用位置越近,其振动响应越剧烈,更容易引



velocity, ice thickness

起结构疲劳损伤,在后期的风机结构的冰激疲劳分 析应重点关注.

通过对风机结构的位移周期和加速度谱分析, 在海冰与风机锥体基础结构作用过程中,风机结构 的桩基部分以结构的一阶自振频率发生振动.由于海 冰断裂长度和攀爬高度的随机性,使得海冰破坏周 期没有恒定的值,风机结构产生冰激稳态振动的条 件^[32]很难出现.因此,海冰破碎作为一种外部激励使 得桩基在一阶自振频率持续振动,其振动形式表现 为随机振动形式.此外,由于风机结构独有的特点: 下部为大刚度桩基和上部为高柔度塔筒,使其动力 特征表现为主从式结构特性^[15].这种主从式结构特 性使得在复杂的冰载荷作用下,风机塔筒(子结构)和 桩基(主结构)表现为不同的响应行为,风机不同部位 振动周期和加速度谱两者出现差异.

4 结 论

本文基于 DEM-FEM 耦合模型,采用具有粘结 破碎的球形离散单元构造海冰,采用梁单元和三角 形板壳单元构造海上单桩式风机结构,模拟风机与 平整冰相互作用过程,研究不同冰速、冰厚工况下, 风机结构冰载荷特点和结构振动响应能力和行为.研 究结果表明,具有抗冰锥体的单桩式风机所承受冰 载荷表现一定的随机性与周期性,并且通过与 ISO-19906标准、IEC6100-3规范中公式对比,验证了本 文 DEM-FEM 耦合模型计算单桩式风机冰载荷正确 性,并得到结构冰载荷与冰厚平方成线性关系;在分 析对比不同工况下风机基础顶端和塔筒顶端的位移 响应中,通过对两部分振动周期的统计分析发现, 塔筒顶部振动周期为结构的一阶自振周期, 而基础 顶端的振动周期为结构的三阶自振周期.此外,通过 引入振幅比,定性地描述结构的动力敏感特性,即塔 筒顶端的振幅极值远大于基础顶端振幅极值,两者 比值在各个工况中基本不变. 这表明由海冰输入的 冰力激振能量大部分由风机上部涡轮机吸收耗散, 并且能量占比变化很小. 在分析对比不同工况下风 机基础顶端和塔筒顶端的振动加速度响应中,得到 两部分的振动加速度峰值均与冰厚平方和冰速乘积 呈线性关系,并且通过对加速度进行谱分析得到风 机振动各部分的振动主频为结构的三阶自振频率.此 外,由于风机结构的动力特征表现为主从式结构特 性,风机不同部位的振动响应行存在很大的差异.综 上,基于DEM-FEM耦合模型可为冰区单桩式风机的 冰载荷、结构动力行为评估和结构冰激疲劳分析提供有益的数值计算方法,具有很强的工程应用背景.

参考文献

- 1 段磊, 李晔. 漂浮式海上大型风力机研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(12): 18-28 (Duan Lei, Li Ye. Progress of recent research and development in floating offshore wind turbines. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46(12): 18-28 (in Chinese))
- 2 陈嘉豪, 胡志强. 半潜式海上浮式风机气动阻尼特性研究.力学学 报, 2019, 51(4): 1255-1265 (Chen Jiahao, Hu Zhiqiang. Study on aerodynamic damping of semi-submersible floating wind turbines. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1255-1265 (in Chinese))
- 3 张大勇, 王国军, 王帅飞等. 冰区海上风电基础的抗冰性能分析. 船舶力学, 2018, 22(5): 615-627 (Zhang Dayong, Wang Guojun, Wang Shuaifei, et al. Ice-resistant performance analysis of offshore wind turbine foundation in ice zone. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(5): 615-627 (in Chinese))
- 4 岳前进, 许宁, 崔航等. 导管架平台安装锥体降低冰振效果研究. 海洋工程, 2011, 2: 18-24 (Yue Qianjin, Xu Ning, Cui Hang, et al. Effect of adding cone to mitigate ice-induced vibration. *The Ocean Engineering*, 2011, 2: 18-24 (in Chinese))
- 5 Seidel M, Hendrikse H. Analytical assessment of sea ice-induced frequency lock-in for offshore wind turbine monopiles. *Marine Structures*, 2018, 60: 87-100
- 6 丁红岩, 韩彦青, 张浦阳等. 全潜式浮式风机基础在不同风况下的 动力特性研究. 振动与冲击, 2017, 36(6): 201-206 (Hongyan Ding, Yanqing Han, Puyang Zhang, et al. Dynamic analysis of the submersible foundation for floating wind turbine in different wind condition. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(6): 201-206 (in Chinese))
- 7 武海斌,黄焱,李伟. 大直径单桩风机基础冰荷载模型试验研究. 海洋工程, 2018, 36(2): 83-91 (Wu Haibin, Huang Yan, Li Wei. Experimental study on the ice load of large-diameter monopile wind turbine foundations. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(2): 83-91 (in Chinese))
- 8 Barker A, Timco G, Gravesen H, et al. Ice loading on Danish wind turbines Part 1: Dynamic model tests. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 41(1): 1-23
- 9 Gravesen H, Sorensen SL, Volund P, et al. Ice loading on Danish wind turbines: Part 2. Analyses of dynamic model test results. *Cold Regions science and Technology*, 2005, 41(1): 25-47
- 10 Wang Q. Ice-inducted vibrations under continuous brittle crushing for an offshore wind turbine. *Norwegian University of Science and Technology*, 2015
- 11 Shi W, Tan X, Gao Z, et al. Numerical study of ice-induced loads and responses of a monopile-type offshore wind turbine in parked and operating conditions. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 123: 121-139
- 12 Heinonen J, Rissanen S. Coupled-crushing analysis of a sea ice-wind turbine interaction - feasibility study of FAST simulation software. *Ships and Offshore Structures*, 2017, 12(7-8): 1056-1063
- 13 Song M, Shi W, Ru Z, et al. Numerical study of the interaction be-

tween level ice and wind turbine tower for estimation of ice crushing loads on structure. *Marine Science and Engineering*, 2019, 7: 439-462

- 14 王国军,张大勇,娄春娟等.冰区海上风机基础的振动分析.船 海工程,2016,45(3):109-113 (Wang Guojun, Zhang Dayong, Lou Chunjuan, et al. Vibration analysis of offshore wind turbine foundation in ice zone. *Hip & Ocean Engineering*, 2016, 45(3): 109-113 (in Chinese))
- 15 黄焱, 马玉贤, 罗金平等. 渤海海域单柱三桩式海上风电结构冰 激振动分析. 海洋工程, 2016, 34(5): 1-10 (Huang Yan, Ma Yuxian, Luo Jinping, et al. Analyses on ice induced vibrations of a tripod piled offshore wind turbine structure in Bohai Sea. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(5): 1-10 (in Chinese))
- 16 王宾, 李红涛, 刘嵩等. 海上风电单桩式支撑结构冰激振动及参数 敏感性分析. 海洋工程, 2020, 38(3): 94-101 (Wang Bin, Li Hongtao, Liu Song, et al. Ice-induced vibration and parameter sensitivity analysis for a monopile supported offshore wind turbine. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(3): 94-101 (in Chinese))
- 17 季顺迎, 狄少丞, 李正等. 海冰与直立结构相互作用的离散单 元数值模拟. 工程力学, 2013, 30(1): 463-469 (Ji Shunying, Di Shaocheng, Li Zheng, et al. Discrete element modeling of interaction between sea ice and vertical offshore structures. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 463-469 (in Chinese))
- 18 刘璐, 尹振宇, 季顺迎. 船舶与海洋平台结构冰载荷的高性能扩展多面体离散元方法. 力学学报, 2019, 51(6): 1720-1739 (Liu Lu, Yin Zhenyu, Ji Shunying. High-performance dilated polyhedral based dem for ice loads on ship and offshore platform structures. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6): 1720-1739 (in Chinese))
- 19 Luo W, Jiang D, Wu T, et al. Numerical simulation of an icestrengthened bulk carrier in brash ice channel. *Ocean Engineering*, 2020, 196: 106830
- 20 龙雪, 宋础, 季顺迎等. 锥角对锥体结构抗冰性能影响的离散元 分析. 海洋工程, 2018, 36(6): 96-104 (Long Xue, Song Chu, Ji Shunying, et al. Influence of cone angle on anti-icing performance of conical structure with numerical simulations of discrete element method. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(6): 96-104 (in Chinese))
- 21 王帅霖, 刘社文, 季顺迎. 基于 GPU 并行的锥体导管架平台结构 冰激振动 DEM-FEM 耦合分析. 工程力学, 2019, 36(10): 28-39 (Wang Shuailin, Liu Shewen, Ji Shuiying. Coupled discrete-finite element analysis for ice-induced vibration of conical jacket platform

based on GPU-based parallel algorithm. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(10): 28-39 (in Chinese))

- 22 Cundall PA, Potyondy DO. A bonded-particle model for rock. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329-1364
- 23 Long X, Liu S, Ji S. Discrete element modelling of relationship between ice breaking length and ice load on conical structure. *Ocean Engineering*, 2020, 201: 107152
- 24 Long X, Ji S, Wang Y. Validation of microparameters in discrete element modeling of sea ice failure process. *Particulate Science & Technology*, 2019, 37(5): 550-559
- 25 Long X, Liu S, Ji S. Breaking characteristics of ice cover and dynamic ice load on upward–downward conical structure based on DEM simulations. *Computational Particle Mechanics*, 2020, https://doi.org/10.1007/s40571-020-00331-8
- 26 吴辉碇,杨国金,张方俭等.渤海海冰设计作业条件.北京:海洋出版社,2001 (Wu Huiding, Yang Guojin, Zhang Fangjian, et al. Design and Operation Conditions of Sea Ice in the Bohai Sea. Beijing: China Ocean Press, 2001 (in Chinese))
- 27 Liu L, Ji SY. Ice load on floating structure simulated with dilated polyhedral discrete element method in broken ice field. *Applied Ocean Research*, 2018, 75: 53-65
- 28 IEC61400-3, Wind turbines Part3: Design requirements for offshore wind turbines. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009
- 29 International Organization for Standardization. ISO 19906: 2010, Petroleum and natural gas industries-Arctic offshore structures. Europe: International Standardization for Organization, 2010
- 30 龙雪, 刘社文, 季顺迎. 水位变化对正倒锥体冰载荷影响的离散 元分析. 力学学报, 2019, 51(1): 74-84 (Long Xue, Liu Shewen, Ji Shunying. Influence of water level on ice load on upward-downward conical structure based on DEM analysis. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 74-84 (in Chinese))
- 31 季顺迎,王安良,车啸飞等. 锥体导管架海洋平台冰激结构振动 响应分析. 海洋工程, 2011, 29(2): 32-39 (Ji Shunying, Wang Anliang, Che Xiaofei, et al. Analysis of ice-induced structure vibration of offshore jacket platform with ice breaking cone. *The Ocean Engineering*, 2011, 29(2): 32-39 (in Chinese))
- 32 Yue Q, Guo F, Kärnä T. Dynamic ice forces of slender vertical structures due to ice crushing. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 56(2): 77-83