

文章编号: 1005-9865(2020)03-0094-08

海上风电单桩式支撑结构冰激振动及参数敏感性分析

王 宾^{1,2}, 李红涛¹, 刘 嵩¹, 万德成²

(1. 中国船级社海洋工程技术中心, 天津 300457; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对渤海湾某风电场的海上固定式风机支撑结构, 采用适用于大直径单桩结构的 PSI 曲线模拟桩土相互作用, 并采用 SACS 软件建立支撑结构的动力分析模型。首先对支撑结构进行模态分析; 其次考虑海冰-结构的随机振动作用模式, 根据适用于渤海湾的随机冰力谱构造随机冰载荷时程曲线, 基于半耦合的时域方法, 采用 SACS 软件对支撑结构进行冰激振动分析, 输出塔筒顶部加速度、单桩基底剪力及倾覆力矩等响应参数的时程曲线和响应功率谱; 最后针对冰厚、冰速和海冰强度等海冰参数对支撑结构的冰激振动进行敏感性分析。研究表明, 在随机振动模式下, 冰载荷及结构动力响应对冰厚和海冰强度较为敏感, 在进行冰激振动分析时应合理确定冰厚和海冰强度等参数。

关键词: 固定式风机; 单桩; 支撑结构; 修正的 PSI 曲线; 随机冰载荷; 冰激振动; 敏感性分析

中图分类号: P752 文献标志码: A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2020.03.010

Ice-induced vibration and parameter sensitivity analysis for a monopile supported offshore wind turbine

WANG Bin^{1,2}, LI Hongtao¹, LIU Song¹, WAN Decheng²

(1. Offshore Engineering Technology Center of CCS, Tianjin 300457, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A dynamic analysis model is established for ice-induced vibration analysis of the bottom-fixed wind turbine in Bohai Bay. The PSI curves applied for the large diameter of monopile are used for simulating the interaction between pile and soil by using the SACS software. Modal analysis of vibration response is performed. A spectral density function is used for obtaining the dynamic ice forces on vertical offshore structure. Ice-induced vibrations of the support structure of the bottom-fixed wind turbine are developed with the semi-coupled time domain method. Therefore, accelerations of the top of the tower, base shears and overturning moments of the monopile are calculated in time domain. Besides, a series of sensitivity analysis of the support structure is obtained with respect to the ice parameters of thickness, velocity and strength. The results show that the ice load and structural dynamic response are sensitive to ice thickness and sea ice strength under random vibration. The ice thickness and sea ice strength should be reasonably determined in ice-induced vibration analysis.

Keywords: bottom-fixed wind turbines; monopile; support structure; modified PSI; random ice loads; ice-induced vibration; sensitivity analysis

海上风机设施的组成一般包括转子-机舱结构和支撑结构, 支撑结构又包括塔筒、下部结构和基础^[1]。我国渤海因所处的地理位置受气象条件影响, 每年冬季皆有不同程度的结冰现象。海冰是一种含有大量孔隙和杂质的非均匀材料, 因此海冰破坏产生的冰载荷具有很强的随机性和非线性^[2]。当海冰与海上风电支

收稿日期: 2019-06-13

作者简介: 王 宾 (1988-), 女, 天津人, 工程师, 从事船舶与海洋结构物动力响应分析方面的研究。E-mail: wangbin@ccs.org.cn

撑结构接触后,支撑结构会产生往复运动,此为冰激振动^[3]。由于单桩式风电设施为高耸的柔性结构,其动力响应较为复杂,在冰载荷的作用下支撑结构振动将导致上部机舱也产生振动,为保证风电机组的正常运行,机舱的运动加速度需限制在一定范围内,因此在设计阶段需要评估冰激振动对海上风电设施的影响。对于直立结构的抗冰问题,目前工程上比较常用的做法是在结构上加装抗冰锥,然而在实际的工程项目中,各种主客观因素叠加会导致直立结构无法加装抗冰锥,因此需要对直立结构的抗冰问题进行深入研究,以指导实际的工程实践。至今学者们已提出了很多适用于直立结构的冰激振动分析的理论模型和数值模型,并开展了大量的室内冰池试验及现场实测研究。

天津大学在室内冰池试验室针对冰载荷与海冰-结构物相互作用等问题开展了丰富的试验研究。史庆增等^[4-6]对低冰速和高冰速作用在直立桩柱上的冰力函数幅值和破碎频率进行了室内冰池试验研究;基于冰力模型试验,研究了多桩结构前冰的非同时破坏现象,给出了冰非同时破坏系数及其概率分布特征;基于试验研究修正了线性多系数 Korzhavin-Afansev 冰力公式中的接触系数,并与非线性的 Schwarz 冰力公式进行比较,得到两个冰力公式之间的定量关系,并明确了后者的适用范围。黄焱等^[7-11]在冰池试验室对单桩和四桩柱结构分别进行了低冰速、中冰速和高冰速下的动冰力模型试验,试验结果表明冰激直立桩结构稳态振动过程中的控制机理是冰与结构的相互作用,并指出当相互作用系数处于 20~45 之间时两种结构在冰力作用下均会发生剧烈的响应。黄焱等^[12]针对渤海某区域的单柱三桩式风电支撑结构进行了冰激振动分析,采用概化冰力函数生成动冰力时程,基于 ANSYS 有限元软件对整体风电结构进行全时域瞬态动力分析。大连理工大学主要采用现场实测方法,对渤海海域的海冰参数概率分布、固定式结构的冰激振动问题进行深入研究。季顺迎等^[13]基于对辽东湾 JZ20-2 海域的海冰定点观测资料和数值模拟结果,给出了该海域的冰厚、冰速、冰向和海冰强度等海冰参数的概率分布。Kärnä 等^[14]基于直立结构现场实测得到的冰力数据,提出了一种可用于工程实际的挤压破碎随机冰力谱模型。Yue 等^[15]对直立结构进行了现场实测,通过对实测数据进行分析发现海冰与结构相互作用的三种模式,分别是准静态、稳态振动和随机振动,证实了 Kärnä 等^[16]的研究结果。Zhang 等^[17]考虑了海冰与结构作用的三种模式,采用 ANSYS 软件对渤海湾导管架平台进行了冰激疲劳分析,给出了一套完整的导管架平台冰激疲劳分析流程,并对比了稳态冰力和随机冰力下直立抗冰结构的疲劳损伤,随机振动冰况远多于稳态冰况,随机振动引起的疲劳损伤较大。

虽然油气行业已经先行开展了大量室内冰池试验研究、海上现场实测研究及数值模拟研究,但是对于海上大直径单桩直立结构相应研究工作尚且不足。本文借鉴海上油气领域的冰激振动研究成果,针对海上风电大直径单桩结构,基于 PSI 曲线,采用 SACS 软件建立海上风机支撑结构模型进行研究。考虑海冰-结构的随机振动作用模式,基于 Kärnä 等^[14]提出的随机冰力谱,自编程序计算随机冰载荷时程曲线,基于半耦合的时域方法对支撑结构进行冰激振动分析,并针对冰厚、冰速和海冰强度等海冰参数对冰激振动响应进行敏感性分析。

1 冰激振动分析模型

1.1 海冰-直立结构作用模式

海冰与直立结构作用时,主要以挤压破坏为主。海冰与直立结构有三种作用模式,分别为低冰速时的准静态模式、中冰速时的稳态模式和高冰速时的随机振动模式^[18]。其中,准静态模式发生在极慢冰速下,当冰速快于间歇性挤压破碎时冰速,冰的破碎与结构振动发生耦合,此时频率锁定,结构发生稳态自激振动。稳态振动的发生条件较为严苛,与直立结构的固有模态和冰速有关,该振动模式的作用时间短而强烈,通常需要在疲劳分析中考虑该模式下结构的疲劳损伤;当冰速很快时,冰排与直立结构的接触位置主要发生脆性挤压破碎,此时直立结构受到随机冰载荷的作用从而发生强迫振动,该作用模式占绝大多数工况。文中主要针对快冰速时的随机振动模式,对海上风电单桩式支撑结构的冰激振动响应进行分析。

1.2 随机冰载荷

一般情况下,冰厚、冰速和海冰强度为冰激振动问题的重要环境条件参数。其中,海冰强度一般分为压缩强度和弯曲强度,对于直立结构,冰排的破坏模式为挤压破坏,所以需要考虑海冰的压缩强度。

1.2.1 最大静冰力

作用在直立的孤立墩柱上的最大静冰力^[19]可由下式确定:

$$F_{\max} = m \cdot I \cdot f_c \cdot \sigma_c \cdot D \cdot h \quad (1)$$

式中: m 为形状系数, 由于结构为圆形截面, 取值 0.9; I 为嵌入系数, f_c 为接触系数, 当结构直径处于 2.5~10 m 范围内, f_c 取值 0.4; σ_c 为海冰压缩强度, MPa; D 为冰挤压结构的宽度, m; h 为冰厚, m。

1.2.2 随机冰力谱

计算采用的挤压破碎随机冰力谱^[10]为:

$$S(f) = s_F^2 \cdot \frac{1.34v^{-0.6}}{1 + 5v^{-0.9} \cdot f^2} \quad (2)$$

$$s_F = \frac{I_F \cdot F_{\max}}{1 + n \cdot I_F} \quad (3)$$

式中: v 为冰速, m/s; f 为频率间隔, Hz; s_F 为随机冰力的标准差; I_F 为动冰力作用强度, 一般取 0.2~0.6, 文中取值为 0.4; n 为常数, 取值为 3; F_{\max} 为最大静冰力, kN。

1.3 动力学方程

海上风机的支撑结构在冰载荷作用下的动力学方程^[20]为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (4)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为支撑结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \ddot{X} 、 \dot{X} 和 X 分别为支撑结构的加速度向量、速度向量和位移向量; $F(t)$ 为冰载荷时程曲线。

2 支撑结构有限元分析

2.1 支撑结构有限元模型

文中支撑结构所处水深约为 12 m, 单桩桩径约为 5.5 m。采用 SACS 软件建立结构的三维有限元模型, 包含风机塔筒、下部结构和单桩基础在内的支撑结构模型。采用集中质量单元模拟转子和机舱, 采用空间杆件结构模拟泥面以上结构, 采用 PSI 曲线 (T-Z、Q-Z、P-Y) 模拟泥面以下的桩土相互作用。泥面以上的支撑结构模型示意如图 1 所示。

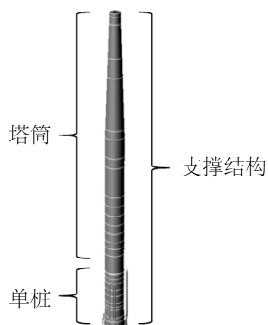


图 1 支撑结构的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of support structure

2.2 模态分析

风机的 $1P$ 频率易与支撑结构的一阶自振频率相近, 因此在进行支撑结构设计时, 其自振频率需避开 $1P$ 和 $3P$ 频率范围, 一般位于 $1P$ 和 $3P$ 之间 (P 为风机转子频率, nP 指 n 个叶片转动频率)。文中涉及的风机 $1P$ 和 $3P$ 频率分别为 0.23 Hz 和 0.69 Hz, 通过对支撑结构进行模态分析 (如表 1 所示), 可知支撑结构的一阶自振频率为 0.28 Hz, 满足设计要求。第 1、2 阶为支撑结构沿 X 、 Y 方向的一阶弯曲振型, 第 3、4 阶为沿 X 、 Y 方向二阶弯曲振型, 第 5、6 阶为沿 X 、 Y 方向三阶弯曲振型。

表 1 支撑结构前 6 阶模态

Tab. 1 First six modes of support structure

阶数	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	0.28	0.28	1.30	1.30	3.31	3.31

2.3 冰激振动分析

选取五个随机种子, 基于表 2 中的海冰参数和式 (2) 的随机冰力谱, 生成随机冰力谱曲线和冰载荷时程曲线。由于文中所采用的随机冰力谱是低频功率谱, 与海洋工程领域常用的风谱 (如 NPD 风谱等) 具有相似的能量分布特征, 因此本文采用业界公认的简谐波叠加法^[21]对冰力谱进行频域到时域的转换。其中一组冰力谱及其时程曲线如图 3 所示。

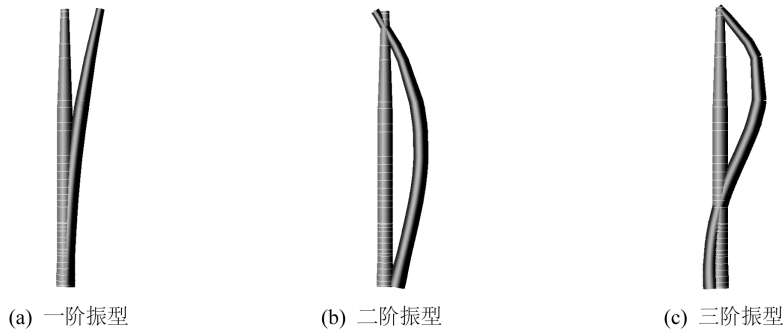


图 2 支撑结构的前三阶振型

Fig. 2 First three modes of support structure

表 2 海冰参数

Tab. 2 Parameters of sea ice

参数	数值
冰厚/cm	30.0
冰速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	50.0
海冰强度/MPa	1.80

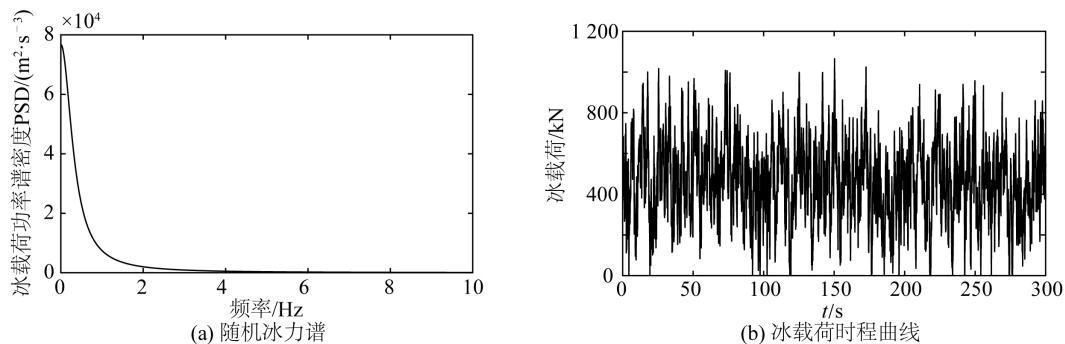


图 3 随机冰力谱和冰载荷时程曲线

Fig. 3 Random ice force spectrum and time history

从图 3 (a) 的随机冰力谱曲线可以看出, 随机冰载荷的能量主要集中在低频区域, 其与风谱的形状相似, 但不同点在于冰力谱的低频范围更大。从表 1 的模态分析结果可以看出, 单桩式支撑结构的一阶频率为 0.28 Hz, 而导管架支撑结构的一阶频率一般约为 1 Hz, 单桩式支撑结构较导管架支撑结构更“柔”。由于频率越低, 冰力谱的能量越集中, 从而可知单桩式支撑结构的冰激振动问题更需要关注。从图 3 (b) 可以看出, 在表 2 所示海冰参数条件下, 冰载荷的量级为 10^3 kN, 虽然比波浪载荷的量级小, 但是由于冰力谱的能量集中在低频范围, 因此冰载荷对单桩式支撑结构的影响不可忽略。

分别将五个随机种子生成的随机冰载荷时程曲线沿海冰漂移方向加载到支撑结构上, 求解单桩式支撑结构的整体动力响应。其中一组计算结果如图 4~6 所示, 分别为塔筒顶部的振动加速度、单桩基底剪力和倾覆力矩时程曲线及其功率谱。

从图 4~6 可以看出, 通过对结构的时域响应做频谱分析, 功率谱均包含三个频率成分, 即 0.28 Hz、1.30 Hz 和 3.31 Hz。由表 1 的模态分析结果可以得知, 上述三个频率分别对应支撑结构的一阶、二阶和三阶自振频率。从图 6 (b) 单桩倾覆力矩响应功率谱可以看出, 二阶和三阶自振频率成分占比很小, 主要以一阶自振频率响应为主; 从图 4 (b) 塔筒顶部加速度响应功率谱可以看出, 与倾覆力矩响应功率谱不同的是, 二阶自振频率成分在加速度响应功率谱中较为显著, 仅次于二阶自振频率成分; 从图 5 (b) 单桩基底剪力响应功率谱可以看出, 单桩基底剪力以二阶自振频率响应为主, 一阶自振频率成分次之; 从所有的响应功率谱可以看出, 三阶自振频率对塔筒顶部加速度、单桩基底剪力和单桩倾覆力矩的影响很小。因此, 塔筒顶部的加速度及单桩倾覆力矩均以支撑结构的一阶自振频率响应为主, 单桩基底剪力以二阶自振频率响应为主。

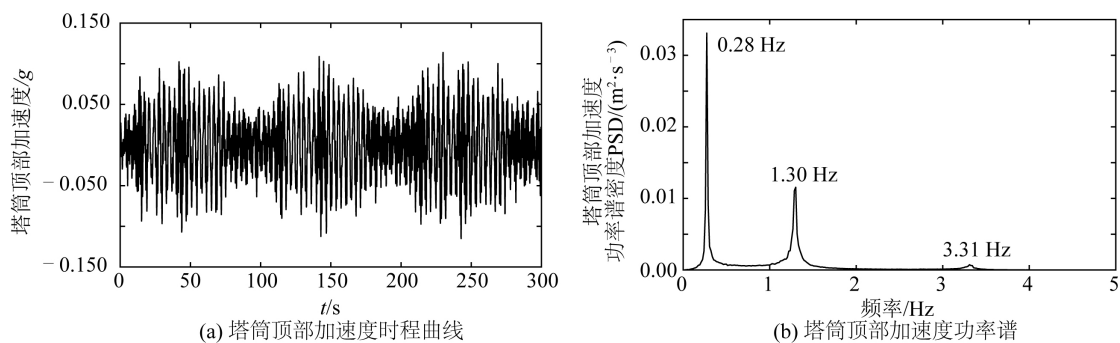


图 4 塔筒顶部加速度时程曲线和功率谱

Fig. 4 Time history and PSD of acceleration at tower top

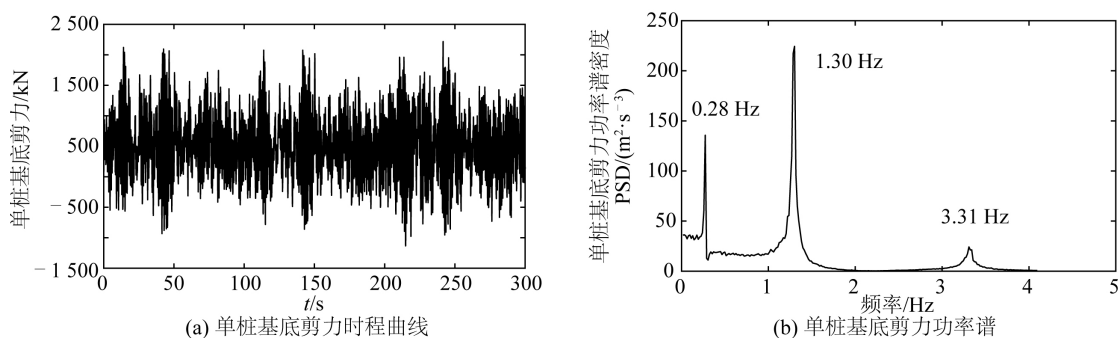


图 5 单桩基底剪力时程曲线和功率谱

Fig. 5 Time history and PSD of base shear

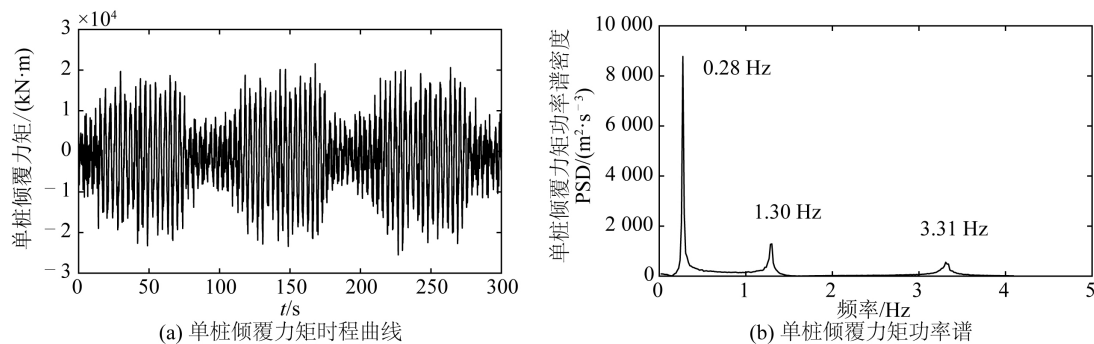


图 6 单桩倾覆力矩时程曲线和功率谱

Fig. 6 Time history and PSD of overturning moment

将五组随机冰载荷作用下的计算结果进行统计,结果如表 3 所示,分别给出了支撑结构响应参数的最大值、1/10 最大值和 1/100 最大值。一般情况下,风机厂商要求机舱位置即塔筒顶部的振动加速度不能超过某个限值,在设计阶段需评估冰激振动引起的塔筒顶部的振动加速度是否处于允许范围内。从表 3 可以看出,当冰厚为 30 cm、冰速为 50 cm/s、海冰强度为 1.80 MPa 时,在随机冰载荷作用下,塔筒顶部的加速度最大值为 $0.12g$ (g 为重力加速度),满足风机厂商的要求(小于 $0.30g$)。对于固定式风机的单桩式支撑结构,基底剪力和倾覆力矩为两个重要的输出参数,可用于校核单桩基础结构强度。

表 3 冰激振动响应结果统计值

Tab. 3 Statistics of ice-induced vibration response results

响应输出参数	最大值	1/10 最大值	1/100 最大值
塔筒顶部加速度	$0.12g$	$0.09g$	$0.11g$
单桩基底剪力/kN	2 270.0	1 783.3	2 124.9
单桩倾覆力矩/(kN·m)	25 481.5	16 865.2	20 634.8

3 海冰参数敏感性分析

针对海上风电大直径单桩结构,改变其环境条件参数,包括冰厚、冰速和海冰强度,以结构所受冰载荷及单桩结构动力响应(塔筒顶部的加速度、基底剪力和倾覆力矩)作为输出。选取表2中的海冰参数作为比较的基准进行敏感性分析。

3.1 冰厚敏感性分析

表2海冰参数基准中冰厚为30 cm,分别将其 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 进行计算。表4为冰载荷和单桩结构动力响应随冰厚变化的百分比。

表4 冰厚敏感性分析计算结果
Tab. 4 Results of ice thickness sensitivity analysis

编号	1	2	3	4	5
冰厚/cm	23.0	27.0	30.0	33.0	36.0
冰厚变化/(%)	-20.0	-10.0	-	+10.0	+20.0
冰载荷变化/(%)	-23.3	-10.0	-	+10.0	+20.0
塔筒顶部加速度变化/(%)	-22.8	-10.0	-	+10.4	+19.9
单桩基底剪力变化/(%)	-22.8	-9.5	-	+10.3	+19.9
单桩倾覆力矩变化/(%)	-23.2	-10.2	-	+10.6	+20.1

3.2 冰速敏感性分析

表2海冰参数基准中冰速为50 cm/s,分别将其 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 进行计算。表5为冰载荷和单桩结构动力响应随冰速变化的百分比。

表5 冰速敏感性分析计算结果
Tab. 5 Results of ice velocity sensitivity analysis

编号	1	2	3	4	5
冰速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0
冰速变化/(%)	-20.0	-10.0	-	+10.0	+20.0
冰载荷变化/(%)	+0.6	+0.3	-	-0.3	-0.5
塔筒顶部加速度变化/(%)	-0.8	-0.3	-	+0.1	+0.3
单桩基底剪力变化/(%)	-1.7	-0.3	-	+1.0	+1.3
单桩倾覆力矩变化/(%)	+0.2	+0.7	-	-0.6	-0.8

3.3 海冰强度敏感性分析

表2海冰参数基准中海冰强度为1.80 MPa,分别将其 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 进行计算。表6为冰载荷和单桩结构动力响应随海冰强度变化的百分比。

表6 海冰强度敏感性分析计算结果
Tab. 6 Results of ice strength sensitivity analysis

编号	1	2	3	4	5
海冰强度/MPa	1.44	1.62	1.80	1.98	2.16
海冰强度变化/(%)	-20.0	-10.0	-	+10.0	+20.0
冰载荷变化/(%)	-20.0	-10.0	-	+10.0	+20.0
塔筒顶部加速度变化/(%)	-19.7	-10.0	-	+10.4	+19.9
单桩基底剪力变化/(%)	-19.6	-9.5	-	+10.3	+19.9
单桩倾覆力矩变化/(%)	-19.5	-10.2	-	+10.6	+20.1

3.4 敏感性指数

敏感性指数^[22]定义为:

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta H/H} \quad (5)$$

式中: R 为研究对象或系统的输出或响应; H 为研究对象或系统的属性或参数; ΔR 、 ΔH 分别为 R 、 H 的变化量。

从敏感性指数的定义可知,系统的输入对输出的影响程度,可通过输出的相对变化与相应输入参数的相对变化的比值表示。表 7 为海冰参数变化 20% 时的敏感性指数。

由表 7 可知,在冰厚、冰速和海冰强度三个输入参数中,冰载荷及结构动力响应对冰厚参数最为敏感,其次是海冰强度,输出参数的变化幅度与输入参数变化幅度相当,而对冰速参数相当不敏感,输出参数的变化幅度远小于输入参数的变化幅度。因此,在选取的冰载荷计算模型下,冰厚及海冰强度对结构响应的影响较大,在进行冰激振动分析时应合理选取上述两个海冰参数。此外,从海冰参数敏感性分析结果可知,随着冰厚、冰速和海冰强度的增大,塔筒顶部振动加速度也随之增大。因此,在评估机舱振动加速度时,如果采用文中的冰载荷计算模型,建议根据目标海域的海冰环境条件资料选取极限冰况作为计算输入。

表 7 海冰参数对冰载荷及单桩结构动力响应的敏感性指数

Tab. 7 Sensitivity indexes of sea ice parameters with respect to ice loads and dynamic responses of monopile structure

海冰参数	冰载荷	塔顶加速度	单桩基底剪力	单桩倾覆力矩
冰厚	1.17	1.14	1.14	1.16
冰速	0.03	0.04	0.09	0.01
海冰强度	1.00	0.99	0.98	0.98

4 结 语

采用 SACS 软件建立海上风电单桩式支撑结构的有限元模型,基于适用于大直径单桩的 PSI 曲线模拟桩土作用,考虑快冰速下的随机冰载荷作用模式,基于随机冰力谱构造冰载荷时程曲线,对渤海湾某风电场的海上固定式风机的支撑结构进行了冰激振动时域分析和海冰参数敏感性分析,结论如下:

1) 随机冰力谱是低频功率谱,能量主要集中在低频范围内。单桩结构的一阶和二阶自振频率处于该低频范围,随机冰载荷容易引起支撑结构发生较大幅度的低频振动;

2) 塔筒顶部的加速度及单桩倾覆力矩均以支撑结构的一阶自振频率响应为主,单桩基底剪力以支撑结构的二阶自振频率响应为主,三阶自振频率对塔筒顶部加速度、单桩基底剪力和单桩倾覆力矩的影响很小;

3) 采用文中选取的随机冰力谱构造随机冰载荷时程曲线的情况下,冰载荷及结构动力响应对冰厚和海冰强度较为敏感,因此在单桩结构的冰激振动分析中,应当在给定环境资料的基础上,合理确定冰厚和海冰强度,以保证在恶劣海冰条件下,塔筒顶部的机舱加速度满足风机厂商的要求;

4) 当评估机舱振动加速度时,如果采用文中的随机冰载荷计算模型,建议根据目标海域的海冰环境条件资料选取极限冰况作为计算输入;

5) 关于最大静冰力的计算方法的选取需要慎重,因为最大静冰力直接影响载荷水平,进而影响结构响应水平。建议结合冰池试验及现场实测结果,对各规范中的最大静冰力计算公式进行评估,选择适用于目标结构的计算方法。

参考文献:

- [1] IEC 61400-3, Wind turbines Part3: Design requirements for offshore wind turbines [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [2] 张希. 冰激直立结构稳态振动 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002. (ZHANG Xi. Steady state ice-induced vibration of vertical structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002. (in Chinese))
- [3] 中国船级社. 固定式海洋钢结构冰激振动与冰激疲劳分析指南 [S]. 北京: 人民交通出版, 2018. (China Classification Society. Guidelines for ice-induced vibration and fatigue of fixed steel offshore structures [S]. Beijing: China Communications Publishing, 2018. (in Chinese))

- [4] SHI Qingzeng , TONG Jianfeng , SONG An. Characteristics of the function of ice force on vertical cylindrical piles [J]. *China Ocean Engineering* , 2001 , 15(3) : 437-443.
- [5] 史庆增, 黄焱, 宋安, 等. 海上多腿结构前冰的非同时破坏系数及其概率分布 [J]. *海洋工程* , 2003 , 21(3) : 34-39. (SHI Qingzeng , HUANG Yan , SONG An , et al. Non-simultaneous failure of ice before multi-leg structures and its probability distribution [J]. *The Ocean Engineering* , 2003 , 21(3) : 34-39. (in Chinese))
- [6] 史庆增, 李明, 宋安, 等. 单桩冰力计算方法的试验研究 [J]. *中国海上油气* , 2004 , 16(6) : 422-425. (SHI Qingzeng , LI Ming , SONG An , et al. Experimental study on the method to calculate ice force on single pile [J]. *China Offshore Oil and Gas* , 2004 , 16(6) : 422-425. (in Chinese))
- [7] 黄焱, 史庆增, 宋安. 冰激柔性直立桩结构振动的模型试验 [J]. *天津大学学报* , 2007 , 40(5) : 530-535. (HUANG Yan , SHI Qingzeng , SONG An. Model test of ice-induced vibration on compliant vertical pile [J]. *Journal of Tianjin University* , 2007 , 40(5) : 530-535. (in Chinese))
- [8] HUANG Yan , SHI Qingzeng , SONG An. Model test study of the interaction between ice and a compliant vertical narrow structure [J]. *Cold Regions Science and Technology* , 2007 , 49(2) : 151-160.
- [9] 黄焱, 史庆增, 宋安. 冰激柔性直立四桩柱结构振动的模型试验 [J]. *天津大学学报* , 2009 , 42(5) : 388-393. (HUANG Yan , SHI Qingzeng , SONG An. Model test of ice-induced vibration on compliant vertical four-pile structure [J]. *Journal of Tianjin University* , 2009 , 42(5) : 388-393. (in Chinese))
- [10] HUANG Yan , MA Jianjun , TIAN Yufeng. Model tests of four-legged jacket platforms in ice: Part 1. Model tests and results [J]. *Cold Regions Science and Technology* , 2013 , 95: 74-85.
- [11] HUANG Yan , MA Jianjun , TIAN Yufeng. Model tests of four-legged jacket platforms in ice: Part 2. Analyses and discussions [J]. *Cold Regions Science and Technology* , 2013 , 95: 86-101.
- [12] 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 [J]. *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 [J]. *The Ocean Engineering* , 2016 , 34(5) : 1-10. (in Chinese))
- [13] 季顺迎, 岳前进, 毕祥军. 辽东湾 JZ20-2 海域海冰参数的概率分布 [J]. *海洋工程* , 2002 , 20(3) : 39-48. (JI Yingshun , YUE Qianjin , BI Xiangjun. Probability distribution of sea ice fatigue parameters in JZ20-2 sea area of the Liaodong Bay [J]. *The Ocean Engineering* , 2002 , 20(3) : 39-48. (in Chinese))
- [14] Kärnä Tuomo , QU Yan , BI Xiangjun , et al. A spectral model for forces due to ice crushing [J]. *Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering* , 2007 , 129(2) : 138-145.
- [15] YUE Qianjin , GUO Fengwei , Kärnä Tuomo. Dynamic ice forces of slender vertical structures due to ice crushing [J]. *Cold Regions Science and Technology* , 2009 , 56(2-3) : 77-83.
- [16] Kärnä T , TURUNEN R. A straightforward technique for analyzing structural response to dynamic ice action [C]//*Proceedings of the Ninth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* , OMAE. 1990: 135-142.
- [17] ZHANG Dayong , WANG Guojun , YUE Qianjin. Evaluation of ice-induced fatigue life for a vertical offshore structure in the Bohai Sea [J]. *Cold Regions Science and Technology* , 2018 , 154: 103-110.
- [18] 张大勇, 刘笛, 许宁, 等. 冰激直立腿海洋平台疲劳寿命分析 [J]. *海洋工程* , 2015 , 33(4) : 35-43. (ZHANG Dayong , LIU Di , XU Ning , et al. Fatigue life analysis of the vertical leg jacket platform induced by ice vibrations [J]. *The Ocean Engineering* , 2015 , 33(4) : 35-43. (in Chinese))
- [19] Q/Hsn 3000-2002, 中国海冰条件及应用规定 [S]. 北京: 中国海洋石油总公司, 2002. (Q/Hsn 3000-2002 , Regulations for offshore ice condition & application in China sea [S]. Beijing: China National Offshore Oil Corporation , 2002. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] SHINOZUKA M , JAN C M. Digital simulation of random processes and its applications [J]. *Journal of Sound & Vibration* , 1972 , 25(1) : 111-128.
- [22] SEN D. A study on sensitivity of maneuverability performance on the hydrodynamic coefficients for submerged bodies [J]. *Journal of Ship Research* , 2000 , 44(3) : 186-196.