

浮冰作用下单桩海上风机动力响应分析

张礼贤¹, 施伟^{1,2†}, 周映鸣³, 李昕^{1,2}

- (1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
3. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:随着海上风电在环渤海地区不断发展,冰激振动响应为当前环渤海地区海上风机面临的重要问题.基于海上风机一体化数值分析软件,对浮冰作用下单桩海上风机动力学响应展开研究.重点探究单桩风机塔基以及泥面线处载荷动力响应变化规律,研究不同冰载数值模型、冰厚以及冰速对单桩海上风机动力响应影响,开展抗冰锥结构下单桩海上风机动力响应影响规律.结果表明:不同冰载数值计算模型下的计算结果差别较大,采用 Matlock 双齿模型计算出的塔基载荷以及泥面线处载荷最大,分别为无浮冰作用的 2.2 倍与 1.3 倍;单桩海上风机动力响应随冰厚增加而增加,冰速变化对单桩海上风机结构荷载影响不明显;采用抗冰锥措施后,作用于单桩海上风机的冰荷载显著降低,极大降低单桩风机塔基以及泥面线位置处的剪力与弯矩,塔基位置处剪力与弯矩的最大值分别为无抗冰锥结构的 82% 与 95%.同时抗冰锥结构可极大降低作用结构上的冰荷载,其冰载最大值与标准差分别为不采用抗冰锥结构的 5% 与 7%.

关键词:海上风机;冰激振动;数值分析;抗冰锥

中图分类号:TK89 **文献标志码:**A

Analysis on Dynamic Response of Monopile Offshore Wind Turbine under Ice-induced Load

ZHANG Lixian¹, SHI Wei^{1,2†}, ZHOU Yiming³, LI Xin^{1,2}

- (1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. China Huaneng Clean Energy Research Institute Limited Company, Beijing 102209, China)

Abstract: At present, offshore wind power is developing continuously in Bohai bay. Ice-induced vibration response is an important problem faced by offshore wind turbines in Bohai bay. Based on the integrated numerical analysis software of offshore wind turbines, the dynamic response of single pile offshore wind under floating ice load is studied. This paper focuses on investigating the variation law of load dynamic response of monopile offshore wind turbines, studies the influence of different ice load numerical models, ice thickness, and ice velocity on monopile offshore wind dynamic response, and carries out the influence law of single pile offshore wind dynamic response of ice-

* 收稿日期:2021-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52071058,52071301), National Natural Science Foundation of China (52071058,52071301); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC1807208), Liaoning Revitalization Talents Program(XLYC1807208)

作者简介:张礼贤(1993—),男,山东诸城人,大连理工大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: weishi@dlut.edu.cn

breaking cone structure. The results show that the calculation results under different ice load numerical calculation models are quite different. The tower foundation load and mud line load calculated by Matlock double tooth model are the largest, which are 2.2 times and 1.3 times of that without floating ice, respectively; The dynamic response of single pile offshore wind turbine increases with the increase of ice thickness, and the change of ice velocity has no obvious effect on the structural load of single pile offshore wind turbine. After the ice-breaking cone is adopted, the ice load acting on the single pile offshore fan is significantly reduced, and the shear and bending moment at the tower foundation and mud surface line of the monopile offshore wind turbine are greatly reduced. The maximum values of the shear and bending moment at the tower foundation are 82% and 95% of the structure without an ice-breaking cone, respectively. At the same time, the ice-breaking cone structure can greatly reduce the ice load on the structure, and its maximum ice load and standard deviation are 5% and 7% of that structure without an ice-breaking cone, respectively.

Key words: offshore wind turbines; ice-induced vibration; numerical analysis; ice-breaking cone

随着化石能源的不断消耗,发展可再生能源成为促进各个国家能源经济发展、能源转型的重要措施之一. 2016年,国家能源局印发《风电发展“十三五”规划》^[1],明确了海上风电的发展目标.海上风机基础型式主要分为固定式和浮式^[2-4],我国近海水深较浅,主要以固定式风机为主.辽宁省环渤海地区风场条件较为优异,已陆续规划花园口、庄河等海上风电场.辽宁省大连海区每年冬季都结冰^[5-6],属于我国冰情较为严重地区,一般每年冰期约为3个月.因此,在渤海湾地区,冰荷载对海上风机动力响应的影响重点考虑.

当前,冰激振动激励研究仍未有定论^[7].具有代表性的海冰动力荷载分析理论主要有:强迫振动理论以及自激振动理论. Matlock等^[8]基于强迫振动理论,建立浮冰加载过程中弹簧阻尼数值模型. Kärnä等^[9]根据实测数据,提出锯齿形冰力函数来计算海洋结构自激振动响应. Yue等^[10]根据渤海海洋平台实测资料,提出不同冰速下的冰激振动模型.近些年来随着固定式海上风机的不断发展,越来越多的研究开始关注冰荷载对固定式海上风机的影响.王国军等^[11]基于ANSYS有限元数值分析方法开展了三桩海上风机在浮冰作用下的动力响应研究.吴泽等^[12]设计了安装抗冰锥结构的物理模型实验.黄焱等^[13]采用锥形结构动冰力函数的方法开展了三桩式海上风电结构的冰激振动分析.张大勇等^[14]开展了渤海地区海上风机的抗冰性能分析. Shi等^[15]及 Zhou等^[16]基于HAWC2开发海上风机冰荷载数值计算模块. Wang^[17]对Kärnä冰力谱模型以及Määtänen-

Blenkarn模型进行对比分析,分析各自模型优缺点.

本文在上述研究基础上,基于渤海某海域实际冰情,开展NREL 5MW单桩海上风机不同冰载数值模型下的结构动力响应分析,探究冰速、冰厚等冰参数对结构动力响应的影响规律,并对采用抗冰锥措施的单桩海上风机动力响应进行对比分析.

1 风机荷载计算模型

1.1 空气动力学荷载

本文采用叶素动量理论^[18-19]计算作用于风机叶片的空气动力荷载,叶素动量理论将风机叶片沿径向离散成各个独立的叶素单元,并做出如下假设:(a)不考虑叶片的沿径向相邻的叶素单元之间的干扰;(b)作用在每一个叶素单元上的气动力载荷在圆环方向上保持恒定,且每个叶素单元受到的气动载荷仅仅由叶片本身翼型的气动性能所决定;(c)不考虑叶片长度对气动力载荷影响.

1.2 冰载计算理论

1.2.1 Matlock冰载模型

Matlock模型主要分为单齿模型和双齿模型.采用单齿模型计算时,假定冰齿之间的距离大于冰齿的最大弹性变形,其计算模型如图1所示.

图1中, Z_0 为第一个冰齿初始计算时所处位置; x 为结构位置; M 为结构质量; K 为结构刚度; C 为结构阻尼; P_{ch} 为冰齿间距; Δ 为冰齿变形; N 为冰齿数量.

单齿随机冰荷载的冰力函数 F 如式(1)所示.

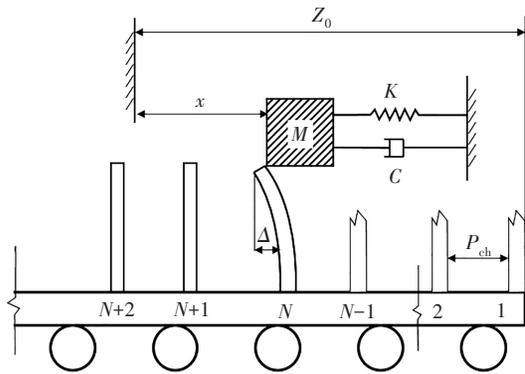


图1 动冰荷载计算模型

Fig.1 Diagram of dynamic ice load model

$$F = \begin{cases} K_{ice} \Delta, & \Delta \leq 0, \Delta = \Delta_{max} \\ 0, & 0 \leq \Delta < \Delta_{max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{ice} 为锯齿刚度; Δ_{max} 为冰齿最大变形.

区别于单齿计算模型, 双齿计算模型考虑了冰最大变形大于冰齿之间的距离的可能性, 其数值计算模型如式(2)所示.

$$F = \begin{cases} 0, & \Delta \leq 0, \Delta = \Delta_{max} \\ K_{ice} \Delta, & 0 < \Delta \leq P_{ch} \\ K_{ice} \Delta + K_{ice} (\Delta - P_{ch}), & P_{ch} < \Delta \leq \Delta_{max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{ch} 为冰齿间距.

1.2.2 非同步失效冰载模型

在非同步失效计算模型^[20]中, 考虑随机冰厚与接触宽度之间的关系, 假定接触体积为 $L \cdot L \cdot L$, 其中 L 为冰齿宽度. 冰荷载的数学计算模型如式(3)所示.

$$F = \begin{cases} K_i [y - y_{max} + v_{ice} t - L(n - 1)], & 0 < \Delta \leq \Delta_L \\ 0, & \Delta \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: y 为失效区域初始接触位置; v_{ice} 为冰速; t 为加载时间; n 为冰齿编号; K_i 为冰的刚度.

1.2.3 弯曲破坏计算模型

之前所有的数值计算模型, 结构均为直立结构, 对于带有斜坡的结构, 冰的破坏更多的可能是弯曲破坏而不是挤压破坏. 由于冰荷载弯曲破坏所产生的力较小, 作用在结构上的力也会较小. Ralston 模型^[21]考虑圆周和侧裂的影响, 弹性地基反应、冰变形和冰泡在圆锥结构上起作用. 水平冰力可表示为:

$$R_H = [A_1 \sigma_r h^2 + A_2 \rho_i g h D^2 + A_3 \rho_i g h_r (D^2 - D_T^2)] A_4 \quad (4)$$

式中: A_1, A_2, A_3, A_4 为计算系数, 具体取值详见文献^[21]; σ_r 为结构的弯曲强度; h 为冰厚; D 为结构的直

径; ρ_i 为冰的密度; h_r 为积冰厚度; D_T 为圆台上部厚度; g 为重力加速度.

2 数值计算模型

2.1 风机数值模型

本文选取的风机数值模型为美国可再生能源实验室开发的 5 MW 单桩海上风机^[22](图2), 该风机为三叶片水平轴风力发电机, 采用变速变桨控制策略. 模型计算水深为 20 m, 详细参数如表 1 所示.

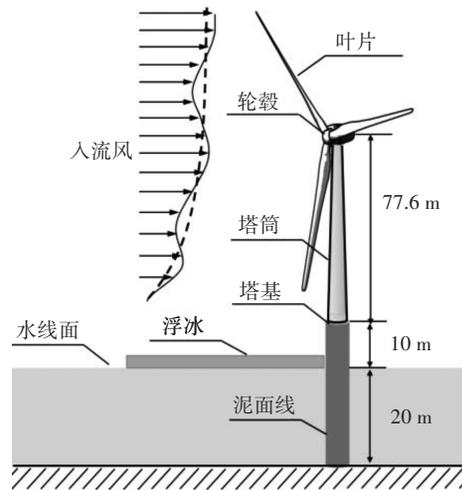


图2 NREL 5 MW 风机模型示意图

Fig.2 Diagram of NREL 5 MW wind turbine

表 1 NREL 5MW 风机参数

Tab.1 Parameters of NREL 5MW wind turbine

参数	数值
功率/MW	5
叶轮直径/m	126
轮毂高度/m	3
切入、额定、切出风速/($m \cdot s^{-1}$)	3, 11.4, 25
切入、额定转子转速/($r \cdot min^{-1}$)	6.9, 12.1
转子、机舱、塔架质量/t	110, 240, 347.46
塔顶直径、壁厚/m	3.870, 0.019
塔筒一阶频率/Hz	0.267

2.2 工况定义

基于渤海海域的相关海况, 制定冰风联合工况. 在一体化风机模型中, 风荷载主要作用在叶片上; 采用多种冰载计算模型进行冰荷载的计算. 采用强迫振动模型时, 浮冰的破碎频率为破碎长度除以冰速.

为此,本文重点探究风冰联合工况下,冰力频率接近塔筒一阶频率(0.267 Hz)冰况下海上风机的动力响应特性.选取额定风速 11.4 m/s 和湍流度 0.12,风载荷作用的时间平均为 1 000 s,本文重点考虑冰载荷对结构动力响应的影响,冰速与冰厚分布见表 2.

表2 浮冰工况

Tab.2 Combination of ice-wind load cases

冰厚/m	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
冰速/(m·s ⁻¹)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

3 结果与讨论

3.1 不同冰载数值计算模型冰荷载对比

图 3 为不同冰载数值模型下的单桩海上风机所受冰荷载的时程曲线对比.采用不同冰载数值模型计算时,单桩海上风机所受冰荷载不同.采用 Matlock 双齿模型计算时,单桩风机所受冰荷载最大,最大约为 3 500 kN;采用非同步失效模型进行计算时,单桩风机所受冰荷载最小,最大值约为 1 900 kN.ISO 给出海上风机直立圆柱冰荷载计算经验公式^[23],采用 ISO 规范计算得到冰厚 0.2 m 下,静冰力载荷的最大值为 3 000 kN,将冰荷载数值计算结果与规范结果进行对比可知,采用 Matlock 模型进行计算时,计算结果与规范值较为接近.

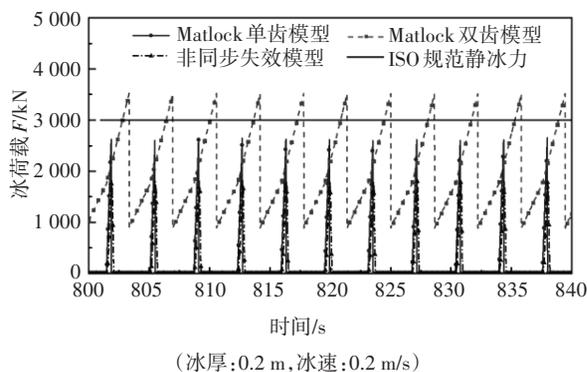
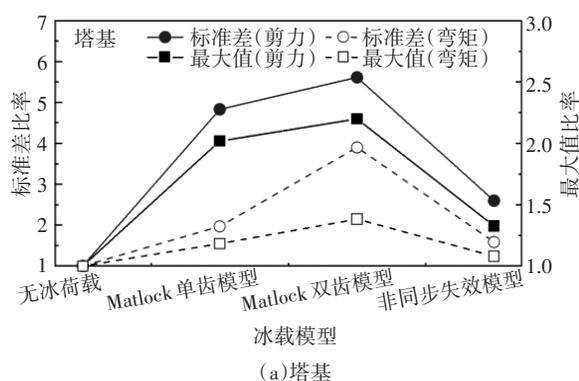


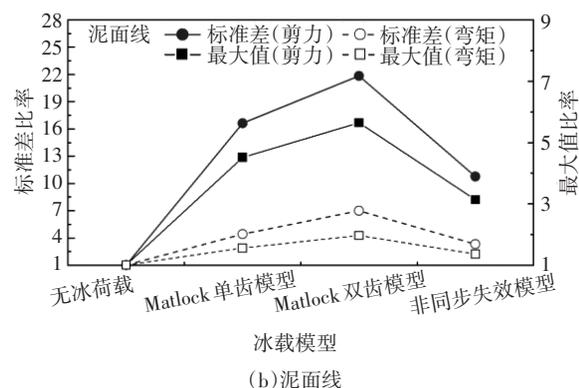
图3 不同冰载模型下的冰力时程曲线

Fig.3 Comparison of ice load between different ice load models(ice thickness:0.2 m, ice speed:0.2 m/s)

塔顶前后垂直于风轮平面,即来流方向.塔基、泥面线处来流方向在不同冰载数值模型下的受力特性见图 4.其中,塔基、泥面线剪力以及弯矩的标准差和最大值均为除以无浮冰作用下对应的荷载的无量纲计算结果.



(a)塔基



(b)泥面线

图4 不同冰载数值模型下塔基与泥面线位置载荷特性

Fig.4 Comparison of tower base and mudline loads under different ice load models

如图 4 所示,浮冰作用下,塔基剪力与弯矩受冰激振动影响,幅值明显增加,且波动变化更为剧烈.不同冰载数值模型塔基剪力以及弯矩受力特性具有较大差异.相比于其他冰载数值计算模型,Matlock 双齿模型计算结果最大,塔基剪力与弯矩最大值分别为无浮冰作用下的 2.2 倍与 1.3 倍.

由泥面线剪力与弯矩在不同冰载数值模型下的动力响应特性可知,相较于塔基载荷特性,浮冰作用下,泥面线剪力以及弯矩受冰激振动影响更加明显,波动变化更为剧烈.由图 4(b)可知,泥面线剪力以及弯矩受冰激振动作用下的标准差最大值分别为浮冰作用下的 22.0 倍与 7.0 倍,最大值分别为无浮冰作用下的 5.5 倍与 2.0 倍.与塔基载荷变化情况较为类似,采用动冰荷载计算模型时,泥面线位置处的载荷变化波动较为剧烈,易产生结构的疲劳破坏.

3.2 冰速、冰厚对结构动力响应的影响

本小节选取非同步失效数值模型,探究在不同冰速以及冰厚下,单桩海上风机受结构冰激振动的动力响应规律.图 5 为结构在不同冰厚以及冰速下单桩海上风机所受冰荷载最大值.结果表明:冰荷载随冰速和冰厚的增加而增加.

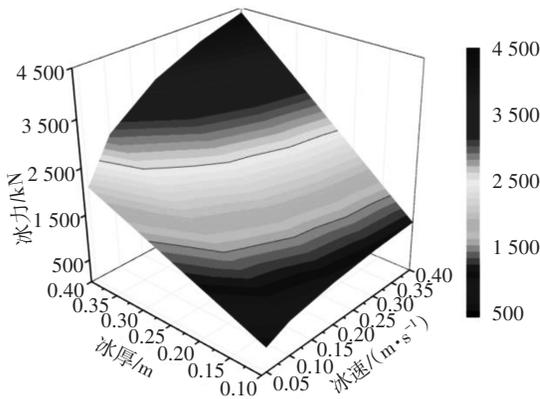
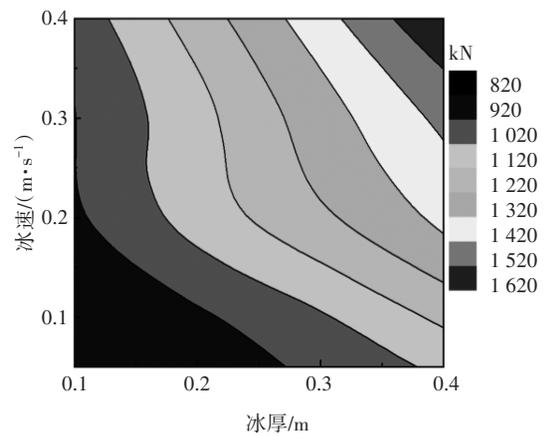
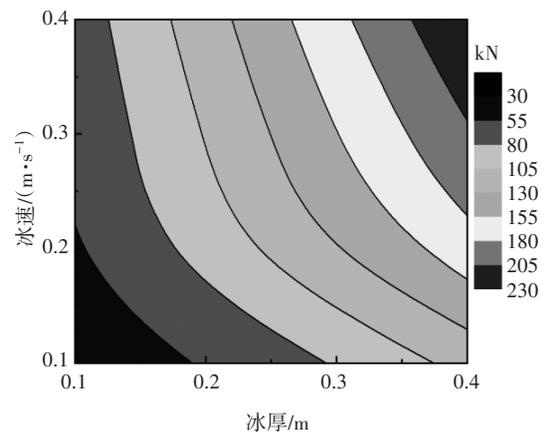


图5 不同冰速以及冰厚下冰荷载最大值
Fig.5 Comparison of ice load under different ice thicknesses and speeds



(a)最大值



(b)标准差

图6 不同冰速以及冰厚下塔基剪力最大值与标准差
Fig.6 Comparison of maximum and STD tower base shear force under different ice thicknesses and ice speeds

图6为不同冰厚以及冰速下塔基剪力的最大值与标准差.表3、表4分别为不同冰速以及冰厚下的塔基与泥面线位置载荷最大值与标准差统计结果.

由图6以及表3、表4可知,塔基以及泥面线位置处载荷随冰速以及冰厚的增加而不断增加.冰厚的变化对塔基与泥面线载荷的最大值影响更大.以塔基剪力为例,相同冰速下(0.2 m/s),不同冰厚塔基剪力最大值分别为:912 kN、1 070 kN、1 210 kN以及1 350 kN,增幅分别为:17%、33%以及48%;相同冰厚(0.2 m)下,不同冰速下的塔基剪力最大值分别为:911 kN、1 070 kN、1 100 kN以及1 180 kN,增幅分别为:17%、21%以及30%.相比于荷载最大值,不同冰速与冰厚对荷载的标准差均有较大影响.

表3 不同冰速与冰厚下塔基与泥面线载荷最大值

Tab.3 Maximum tower base and mudline load for different ice speeds and thicknesses

冰厚/m	冰速/(m·s ⁻¹)	塔基剪力/kN	塔基弯矩/(kN·m)	泥面线剪力/kN	泥面线弯矩/(kN·m)
0.1	0.1	8.39×10 ²	6.27×10 ⁴	1.48×10 ³	9.55×10 ⁴
	0.2	9.12×10 ²	6.24×10 ⁴	1.73×10 ³	1.00×10 ⁵
	0.3	9.24×10 ²	6.33×10 ⁴	1.85×10 ³	1.04×10 ⁵
	0.4	9.71×10 ²	6.42×10 ⁴	1.96×10 ³	1.06×10 ⁵
0.2	0.1	9.11×10 ²	6.53×10 ⁴	2.18×10 ³	1.09×10 ⁵
	0.2	1.07×10 ³	6.59×10 ⁴	2.66×10 ³	1.17×10 ⁵
	0.3	1.10×10 ³	6.72×10 ⁴	2.88×10 ³	1.24×10 ⁵
	0.4	1.18×10 ³	6.88×10 ⁴	3.10×10 ³	1.28×10 ⁵
0.3	0.1	1.02×10 ³	6.81×10 ⁴	2.84×10 ³	1.22×10 ⁵
	0.2	1.21×10 ³	6.95×10 ⁴	3.60×10 ³	1.34×10 ⁵
	0.3	1.28×10 ³	7.13×10 ⁴	3.92×10 ³	1.43×10 ⁵
	0.4	1.39×10 ³	7.36×10 ⁴	4.23×10 ³	1.49×10 ⁵
0.4	0.1	1.15×10 ³	7.14×10 ⁴	3.45×10 ³	1.34×10 ⁵
	0.2	1.35×10 ³	7.33×10 ⁴	4.53×10 ³	1.52×10 ⁵
	0.3	1.45×10 ³	7.57×10 ⁴	4.94×10 ³	1.62×10 ⁵
	0.4	1.63×10 ³	7.83×10 ⁴	5.37×10 ³	1.70×10 ⁵

表 4 不同冰速与冰厚下塔基与泥面线载荷标准差

Tab.4 STD values of tower base and mudline load for different ice speeds and thicknesses

冰厚/m	冰速/($m \cdot s^{-1}$)	塔基剪力/kN	塔基弯矩/($kN \cdot m$)	泥面线剪力/kN	泥面线弯矩/($kN \cdot m$)
0.1	0.1	4.02×10	2.41×10^3	1.78×10^2	4.87×10^3
	0.2	5.25×10	2.51×10^3	2.32×10^2	5.82×10^3
	0.3	6.06×10	2.57×10^3	2.58×10^2	6.28×10^3
	0.4	6.68×10	2.63×10^3	2.84×10^2	6.65×10^3
0.2	0.1	5.71×10	3.21×10^3	3.49×10^2	8.23×10^3
	0.2	8.89×10	3.45×10^3	4.63×10^2	1.04×10^4
	0.3	1.06×10^2	3.61×10^3	5.16×10^2	1.14×10^4
	0.4	1.19×10^2	3.76×10^3	5.65×10^2	1.21×10^4
0.3	0.1	8.22×10	4.30×10^3	5.27×10^2	1.20×10^4
	0.2	1.28×10^2	4.69×10^3	6.99×10^2	1.53×10^4
	0.3	1.54×10^2	4.93×10^3	7.79×10^2	1.68×10^4
	0.4	1.74×10^2	5.16×10^3	8.49×10^2	1.79×10^4
0.4	0.1	1.13×10^2	5.56×10^3	7.09×10^2	1.59×10^4
	0.2	1.68×10^2	6.08×10^3	9.38×10^2	2.03×10^4
	0.3	2.02×10^2	6.40×10^3	1.04×10^3	2.23×10^4
	0.4	2.28×10^2	6.69×10^3	1.14×10^3	2.37×10^4

泥面线载荷较塔基载荷受冰速以及冰厚影响更大.以泥面线弯矩为例.相同冰速(0.2 m/s)下,不同冰厚泥面线弯矩最大值分别为: 1.00×10^5 $kN \cdot m$ 、 1.17×10^5 $kN \cdot m$ 、 1.34×10^5 $kN \cdot m$ 以及 1.52×10^5 $kN \cdot m$,增幅分别为:17%、34%以及 52%,泥面线弯矩标准差的相对增幅分别为:79%、163%以及 249%.由此可见,冰荷载作用下,泥面线载荷波动较为剧烈,易引起较大的疲劳荷载.

3.3 抗冰锥结构对结构动力响应性能影响

目前,冰区海上风机常在单桩结构加装抗冰锥,使得冰荷载的破坏形式转化为弯曲破坏,从而降低作用于单桩基础结构上的冰荷载.分别采用 Ralston 方法^[21]与 Augusti 方法^[24]计算作用于抗冰锥结构上的冰荷载.本小节探究采用抗冰锥结构形式单桩海上风机塔基以及泥面线位置处的载荷特性.模拟风速为 11.4 m/s,冰厚 0.2 m,冰速 0.2 m/s.其中,抗冰锥水线面位置处直径为 8 m,锥角为 45° .图 7 为采用抗冰锥结构塔基以及泥面线位置处载荷变化.需要注意的是,图 7 所示结果为采用抗冰锥结构的动力响应值除以不采用抗冰锥结构非同步失效模型下动力响应值的无量纲最大值与标准差.

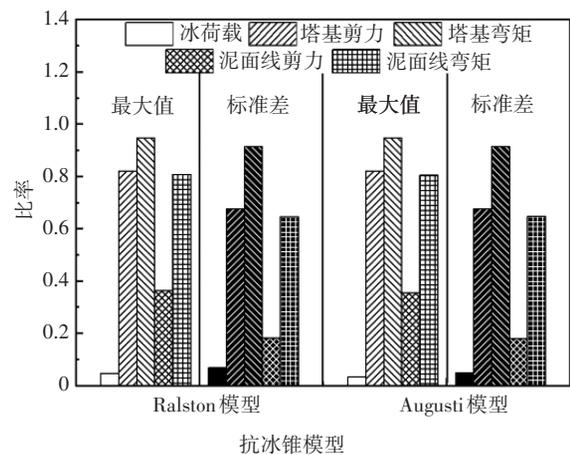


图 7 采用抗冰锥结构塔基以及泥面线位置处载荷特性

Fig.7 Dynamic responses of tower base and mudline using ice cone structure

结果显示:采用抗冰锥结构,由于冰的破坏形式转化为弯曲破坏后,作用于结构上的冰荷载大大减小.加装抗冰锥结构,采用两种荷载计算模型的计算结果较为接近.以 Ralston 模型为例,冰荷载的最大值与标准差分别为不采用抗冰锥结构的 5%与 7%.由于作用于结构上的冰荷载较小,塔基以及泥面线

位置处的剪力以及弯矩减小,塔基位置处剪力与弯矩最大值分别为无抗冰锥结构的82%、95%,标准差分别为无抗冰锥结构的67%与91%。相比于塔基,泥面线位置处的载荷变化更为明显,泥面线位置处剪力与弯矩的最大值分别为无抗冰锥结构的36%与81%,标准差分别为18%与65%。综上所述,采用抗冰锥结构,有益于降低塔基以及泥面线位置处的载荷响应。

4 结论与展望

本文基于FAST耦合数值分析软件,开展了风冰耦合作用下单桩海上风机动力响应分析的研究,得出如下结论:

1)冰荷载对单桩海上风机动力响应具有重要影响。以Maltock双齿计算模型为例,考虑冰荷载作用塔基与泥面线位置处剪力与弯矩的最大值分别为无浮冰作用下的2.2倍与1.3倍。与塔基位置处动力响应相比,泥面线载荷响应受冰激振动作用更为明显,波动更为剧烈。泥面线剪力与弯矩最大值分别为无浮冰作用下的5.5倍与2.0倍。同时,采用不同冰载数值模型计算结果具有一定的差别,采用Matlock双齿模型计算结果最大。

2)结构动力响应随冰速、冰厚的增加而增加。相比于冰速参数,冰厚对结构动力响应的最大值影响更大,不同冰厚下塔基剪力最大值的增幅分别为17%、33%以及48%,而不同冰速下塔基剪力最大值的增幅分别为17%、21%以及30%。对于塔基与泥面线位置处的载荷波动,冰厚与冰速对结构的动力响应均有较大的影响。同时,泥面线载荷更易受冰激振动的影响,波动更为剧烈,需重点关注。

3)加装抗冰锥结构能有效降低结构的载荷响应。由于采用抗冰锥结构,冰的破坏形式发生变化,作用于结构上的冰荷载减小,塔基与泥面线载荷响应显著降低。塔基剪力与弯矩的最大值分别为无抗冰锥结构的82%与95%,泥面线剪力与弯矩的最大值分别为无抗冰锥结构的36%与81%。综上所述,采用抗冰锥结构,有益于降低塔基以及泥面线位置处的载荷响应。

本文忽略了极限海况等停机工况,同时忽略了桩土作用对单桩海上风机的动力响应性能的影响,

还需在后续的工作中进一步研究。

参考文献

- [1] 国家能源局. 风电发展十三五规划[R]. 北京: 国家能源局, 2016: 10-11.
National energy administration. 13th five-year plan for wind power development [R]. Beijing: National Energy Administration, 2016: 10-11. (In Chinese)
- [2] 邓露, 肖志颖, 黄民希, 等. 考虑流固耦合的近海风机动力响应数值计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(7): 1-8.
DENG L, XIAO Z Y, HUANG M X, *et al.* Numerical simulation of dynamic response for offshore wind turbines including fluid-structure interaction [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(7): 1-8. (In Chinese)
- [3] 邓露, 黄民希, 肖志颖, 等. 考虑气动阻尼的浮式风机频域响应分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 1-8.
DENG L, HUANG M X, XIAO Z Y, *et al.* Analysis on frequency response of floating wind turbine considering the influence of aerodynamic damping [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(1): 1-8. (In Chinese)
- [4] ZENG X M, SHI W, MICHAELIDES C, *et al.* Numerical and experimental investigation of breaking wave forces on a monopile-type offshore wind turbine [J]. Renewable Energy, 2021, 175: 501-519.
- [5] 王可光, 吴辉斌, 王彩欣, 等. 渤海冰期的基本水文气象参量研究[J]. 海洋通报, 1999, 18(2): 17-28.
WANG K G, WU H D, WANG C X, *et al.* A study of basic hydrologic and meteorological parameters in the ice-covered Bohai Sea [J]. Marine Science Bulletin, 1999, 18(2): 17-28. (In Chinese)
- [6] 左晶晶, 李昕, 王文华, 等. 极端海冰荷载作用下海上上升压站平台安全评价[J]. 太阳能学报, 2018, 39(9): 2508-2514.
ZUO J J, LI X, WANG W H, *et al.* Safety assessment of offshore substation platform under extreme ice conditions [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(9): 2508-2514. (In Chinese)
- [7] 徐继祖. 海冰引起的结构振动[J]. 海洋工程, 1986, 4(2): 42-47.
XU J Z. Structural vibration induced by sea ice [J]. The Ocean Engineering, 1986, 4(2): 42-47. (In Chinese)
- [8] MATLOCK H, DAWKINS W P, PANAK J J. Analytical model for ice-structure interaction [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1971, 97(4): 1083-1092.
- [9] KÄRNÄ T, KAMESAKI K, TSUKUDA H. A numerical model for dynamic ice-structure interaction [J]. Computers & Structures, 1999, 72(4/5): 645-658.
- [10] YUE Q J, GUO F W, KÄRNÄ T. Dynamic ice forces of slender

- vertical structures due to ice crushing[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 56(2/3): 77-83.
- [11] 王国军, 张大勇, 娄春娟, 等. 冰区海上风机基础的振动分析[J]. *船海工程*, 2016, 45(3): 109-113.
WANG G J, ZHANG D Y, LOU C J, *et al.* Vibration analysis of offshore wind turbine foundation in ice zone[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2016, 4(3): 109-113. (In Chinese)
- [12] 吴泽, 闫园园. 海上风机基础防冰实验与研究[J]. *科技展望*, 2016, 26(27): 75-76.
WU Z, YAN Y Y. Experiment and research on anti-icing of offshore wind turbine foundation [J]. *Science and Technology*, 2016, 26(27): 75-76. (In Chinese)
- [13] 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 Y, MA Y X, LUO J P, *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)
- [14] 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[J]. *船舶力学*, 2018, 22(5): 615-627.
ZHANG D Y, WANG G J, WANG S F, *et al.* Ice-resistant performance analysis of offshore wind turbine foundation in ice zone[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(5): 615-627. (In Chinese)
- [15] 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 [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 123: 121-139.
- [16] ZHOU L, DING S, SHI W, *et al.* Modeling of non-simultaneous ice crushing loads on large sloped cone of wind turbine towers [C]// *Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference*. Hawaii: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019: 321-329.
- [17] WANG Q. Ice-induced vibrations under continuous brittle crushing for an offshore wind turbine [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015: 19-23.
- [18] RIJS R, SMULDERS P T. Blade element theory for performance analysis of slow running wind turbines [J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 1990, 14(2): 62-79.
- [19] 赵振宙, 王同光, 郑源. 风力机原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
ZHAO Z Z, WANG T G, ZHENG Y. Principle of wind turbine [M]. Beijing: China Water Power Press, 2016. (In Chinese)
- [20] ASHBY M F, PALMER A C, THOULESS M, *et al.* Nonsimultaneous failure and ice loads on Arctic structures [C]// *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1986: 399-412.
- [21] RALSTON T D. Plastic limit analysis of sheet ice loads on conical structures [C]// *Physics and Mechanics of Ice*. 1980: 101-105.
- [22] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, *et al.* Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [R]. Golden: National Renewable Energy Lab, 2009.
- [23] *Petroleum and natural gas industries—fixed steel offshore structures: ISO 19902* [S]. Europe: International Organization for Standardization, 2008: 34-38.
- [24] FENG L, QIANJIN Y, SHKHINEK K N, *et al.* A qualitative analysis of breaking length of sheet ice against conical structures [C]// *Proceeding of the POAS Symposium on Ice*. Trondheim: Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions (POAC), 2003: 1-10.