

基于防屈曲支撑的导管架大型风机冰激振动响应分析

宋丹¹, 张纪刚^{1,*}, 马哲昊¹, 张鹏飞², 赵国良³, 宋罕宇⁴

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中建八局 第二建设有限公司青岛分公司, 青岛 266061;
3. 青岛第一市政工程有限公司, 青岛 266034; 4. 中国建筑上海设计院有限公司, 上海 200063)

摘要: 位于寒区的导管架大型风机在服役期间易遭受冰荷载的作用, 冰激振动响应显著。为保证风机安全运行, 要求其必须具备一定的抗冰性能。而导管架支撑构件一般是细长比较大的薄壁空心圆筒结构, 在极端冰荷载作用下易发生屈曲破坏, 从而导致主体结构遭受更大的冰激振动。为解决这一问题, 提出基于防屈曲支撑(BRB)的导管架风机结构。以渤海某四桩导管架大型风机为例, 利用 ANSYS 有限元软件建立结构的简化模型, 对其进行屈曲分析, 将易发生屈曲的杆件换成防屈曲支撑, 分别对替换前后的风机在 3 条挤压冰荷载作用下的振动响应进行对比分析。结果表明: BRB 风机结构在不同挤压冰荷载作用下, 均可以减小关键位置的峰值位移、峰值加速度, 尤其在 Push2 冰荷载作用下结构振动响应甚至可减小 26% 以上。该研究成果可为其他同类型海上风机结构设计与研究工作提供参考。

关键词: 海上导管架风机; 防屈曲支撑; ANSYS; 屈曲分析; 动力响应; 抗冰减振

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)01-0001-09

Analysis of the ice excitation vibration response of large wind turbines on duct frame based on buckling restrained brace

SONG Dan¹, ZHANG Jigang^{1,*}, MA Zhehao¹, ZHANG Pengfei², ZHAO Guoliang³, SONG Hanyu⁴

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;
2. Qingdao Branch of the Second Construction Co. Ltd., China Construction Bureau 8, Qingdao 266061, China;
3. Qingdao First Municipal Engineering Co. Ltd., Qingdao 266034, China;
4. China Architecture Shanghai Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Large wind turbines on conduit frames located in cold regions are susceptible to ice loads during service and have a significant ice vibration response. In order to ensure the safe operation of the turbine, it is required to have a certain degree of ice resistance. The support members of the conduit frame are generally thin-walled hollow cylindrical structures with relatively large slenderness, which are prone to buckling damage under extreme ice loads and will result in greater ice vibration of the main structure. To solve this problem, a duct frame fan structure based on buckling restrained brace(BRB) is proposed. Taking a large wind turbine on four-pile duct frame in Bohai Sea as an example, this study establishes a simplified model of the structure by using ANSYS finite element software. Then, it performs the

收稿日期: 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2106222)

作者简介: 宋丹(1997-), 女, 山东济南人。硕士, 研究方向为海上抗冰设计。E-mail: 2086285076@qq.com。

* 通信作者: 张纪刚(1975-), 男, 山东沂水人。博士, 教授, 主要从事结构振动控制方面的研究。E-mail: jingangzhang@126.com。

buckling analysis and replaces the rods prone to buckling with buckling restrained brace. Finally, it conducts a comparative analysis of the vibration response of the wind turbine before and after the replacement under the action of three extruded ice loads. The results show that the BRB wind turbine structure can reduce the peak displacement and peak acceleration at key locations under different squeeze ice loads, especially under Push2 ice load, and the vibration response of the structure can be reduced by more than 26%. The research results can provide reference for the study and design of other offshore wind turbine structures of the same type.

Key words: offshore jacket fans; buckling restrained brace; ANSYS; buckling analysis; dynamic response; anti-icing damping

在低碳环保的大背景下,绿色能源长远发展的目标明确。其中风能凭借环保、无公害、产能大等优点成为发展最快的清洁能源之一。发展风电是我国实现“双碳目标”的重要途径,随着陆地风电场的饱和,海上风电已成为我国“十四五”能源转型的重要战略发展路线^[1]。目前,我国海上风机重点安装在空气密度较高、风能密度较大的中高纬度寒区海域。渤海海域是我国唯一的高纬度寒区海域,同时也是我国领海海域中风能储量密度最大的海域^[2]。因此,渤海海域是我国发展海上风电产业的重点海域。然而,在冬季受冷空气和寒潮的影响,渤海冰情较为严重,重冰期甚至会导致结构关键位置发生破坏进而倒塌^[3-4]。其次,一般情况下,高耸柔性的导管架大型风机支撑构件都是薄壁空心圆筒形结构,这类钢结构杆件细长比较大,在地震、风、冰等极端荷载下易发生屈曲破坏。一旦发生屈曲,支撑的刚度和承载能力会迅速下降,导致主体结构突然承受更大的荷载,最终可能造成整个结构破坏失效。

针对海上风机结构冰激振动问题,国内外学者进行了相关研究:BARKER 和 GRAVESEN 等^[5-6]以丹麦海域海上风机为研究对象,对加锥和无锥桩腿进行了冰激振动实验并分析了海上风机在风-冰联合作用下的影响;张大勇等^[7]根据多年现场冰与结构作用监测数据和对冰荷载的研究成果,提出了海上风机结构设计中需考虑的失效模式及评价方法,并以渤海某典型风机为例进行抗冰性能评价;黄焱等^[8]利用 ANSYS 有限元软件建立单桩三桩式结构为支撑的海上风电模型,采用概化冰力函数确定的动冰力时程,对结构进行不同海冰工况下的瞬态动力分析;闯振菊等^[9]利用 FAST 软件建立了导管架式一体化风机数值模型,研究桩腿加抗冰锥体前后结构的抗冰性能,研究表明安装抗冰锥体后的冰激振动降低明显。上述大部分学者研究单桩风机较多,研究大型导管架支撑结构冰激振动问题较少。

关于海上风机支撑结构屈曲问题,部分学者也进行过针对性研究:赵聪杰^[10]开展台风环境下海上风机的易损性分析,研究表明塔筒和导管架支撑结构在台风作用下的主要破坏形式分别为屈曲和屈服破坏;YAN 等^[11]通过 ANSYS 有限元软件分析了 10 MW 单桩海上风机在地震、风等多种环境荷载作用下的动力响应和屈曲,研究发现由于屈曲的发生,环境载荷的变化将导致屈曲模态之间的过渡;PATIL 等^[12]通过 GH Bladed 软件建立了 1.65 MW 的风机模型,计算了结构在地震与风荷载下的动力响应,分析表明风机支撑结构在地震作用下极易发生局部屈曲。但上述学者仅对单桩风机进行了研究且忽略了冰荷载的影响。

本文以渤海某 10 MW 四桩导管架大型风机为研究对象,利用 ANSYS 有限元软件建立该风机结构的足尺模型。考虑结构几何、材料的非线性特性,对其进行屈曲分析,将易发生屈曲的杆件换成防屈曲支撑,并对替换前后的导管架风机结构在 3 条挤压冰荷载下的振动响应进行对比分析,以期为其他同类型海上风机结构设计与研究工作提供参考。

1 海上导管架风机有限元模型

1.1 风机模型

利用 ANSYS 有限元分析软件对渤海某四桩导管架风机建立简化模型,如图 1 所示。取渤海平均海平面作为零高程面建立 O-XYZ 坐标系,水平向东为 X 轴正向,垂直于水面向上为 Y 轴正向,水平向南为

Z 轴正向。模型中的所有杆件均采用 beam188 单元进行创建。将机舱(总质量为 446 036 kg)和轮毂(包含叶片,总质量为 230 667 kg)各自简化成一个质量单元,选用 mass21 单元模拟,以集中质量的形式分别施加在塔筒顶部和机舱单元前端。已知该风机所处海域的土壤为硬黏土,因此采用自泥面垂直向下延长四倍桩直径作为等效桩长、桩腿底部固接的方法来简化模拟非弹性土和桩的相互作用^[13]。

结构自上而下包括机舱、塔筒、过渡段、导管架、桩腿,其中轮毂到偏航轴的距离为 7.1 m;塔筒和过渡段斜撑均采用下大上小的变截面形式;导管架上部间距为 12 m,底部间距为 32 m,四根导管腿在每个立面(前、后、左、右立面)由三个大小不一的交叉支撑连接,自上而下分为第一层、第二层、第三层;四根竖直桩腿按正方形分布。材料均采用 Q345B 钢材,其材料属性见表 1,构件具体尺寸参数见表 2。

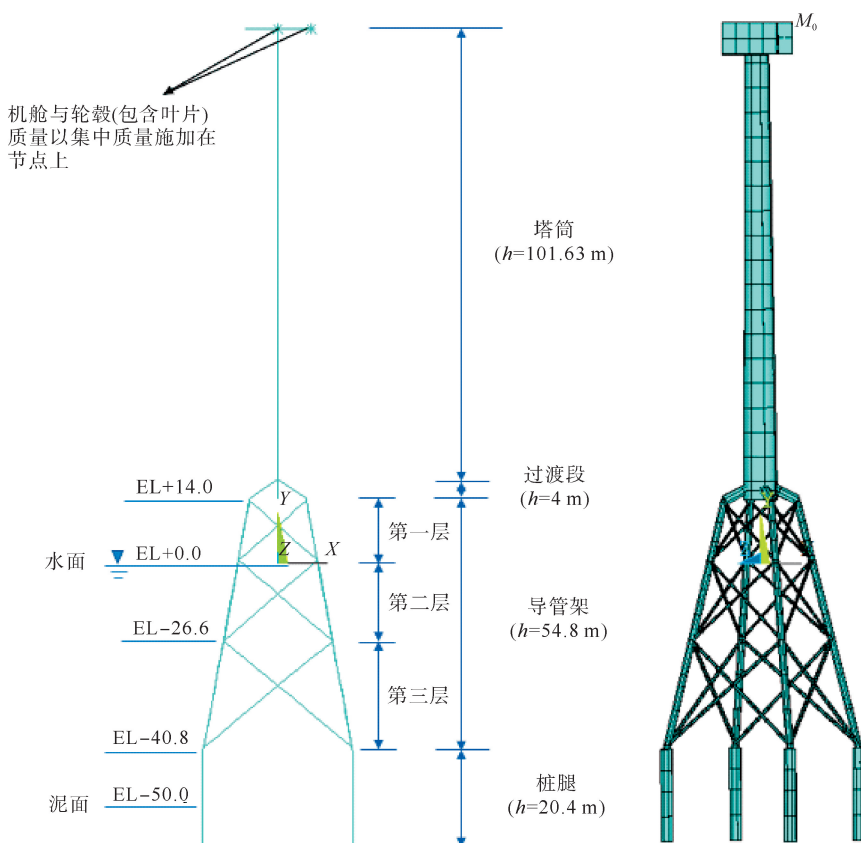


图 1 四桩导管架风机有限元模型

表 1 钢材的材料属性

弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	材料密度 $\rho /(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	屈服应力 σ_s/MPa	切线模量 E_t/MPa
206	0.3	7850	345	610

表 2 截面尺寸参数

构件名称	塔筒	过渡段	导管腿	斜撑(第一层)	斜撑(第二层)	斜撑(第三层)	桩腿
管半径	2.750~3.981	0.800~1.600	0.825	0.300	0.320	0.420	1.400
壁厚	0.020~0.036	0.070	0.045	0.024	0.026	0.030	0.055

1.2 模态分析

利用 ANSYS 有限元软件对导管架风机结构进行模态分析,通过模态分析得到振型和固有频率,如表 3 和图 2 所示,由于篇幅有限,仅列出原结构的第 1,3,5,7 阶模态振型图。

由于工程计算只关心风机结构前两阶的固有频率^[14],因此将本文有限元模型的前两阶频率与原风机结构的基频(0.24~0.25 Hz)进行对比,其结果均在合理范围内,从而验证了建模方法的正确性。

表3 导管架风机前7阶频率

阶数/阶	1	2	3	4	5	6	7
固有频率/Hz	0.2401	0.2402	1.6239	1.6410	2.5312	2.5763	2.9885

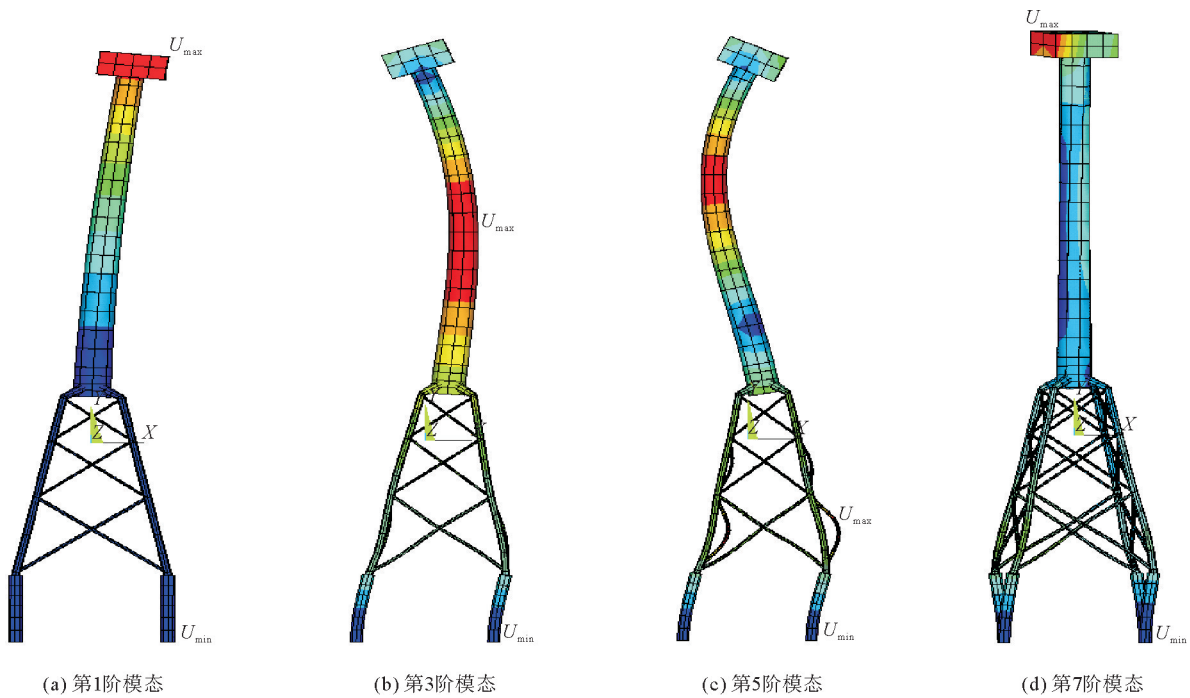


图2 原结构模态振型
U—位移

2 屈曲分析

2.1 线性屈曲分析

考虑 X 正向来冰(不考虑遮蔽效应),将四个水平方向、大小为 1 kN 的载荷分别施加在风机结构与海冰作用(标高 EL+0.0)处,即分别施加在导管架结构中的四根主导管腿上。在 ANSYS 中进行线性屈曲分析,并提取前 3 阶屈曲模态,如图 3 所示。

由图 3 可知,结构变形最大的位置主要发生在导管架第二层前、后立面的受压支撑中。由于海冰与导管腿发生相互作用时,该处支撑除自身长细比较大外还承受着更大的冰荷载,是主要的受力构件,所以此处更容易发生破坏。

2.2 非线性屈曲分析

为了模拟真实构件的屈曲行为,将第 1 阶屈曲模态变形的 1% 作为初始缺陷施加到原结构上(通常第

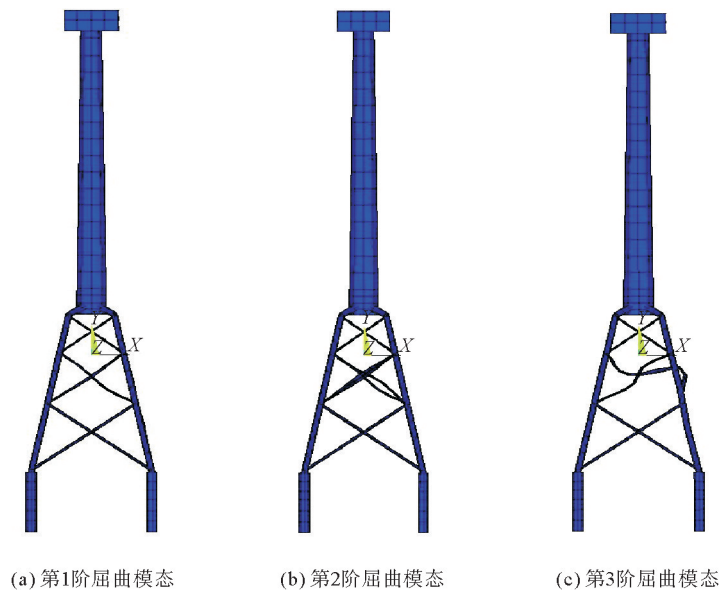


图3 导管架风机结构屈曲模态

1 阶屈曲模态是结构最易达到的变形形状)。海上风机属于低阻尼结构,考虑 Rayleigh 阻尼,取阻尼比为 0.02^[15]。

牛顿-拉夫森(Newton-Raphson)迭代法能获得比较精确的屈曲响应,因此采用该方法进行非线性屈曲分析。以线性屈曲分析得到的临界荷载为最终荷载对结构进行推覆分析,得到结构屈曲图(图 4),空间位移最大值出现在 186 号节点。由于风机模型前后对称,因此在 ANSYS 后处理中仅提取 186 号节点的压应力和位移数值。为让曲线表达更直观,将压应力值加负号变为正值,得该节点的应力-位移曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,支撑压应力达到 251.3 MPa 后开始下降,而位移却继续增大。根据压杆稳定性的定义^[16]可知,导管架第二层前、后立面的受压支撑发生了屈曲破坏。因此,针对这一现象的发生,本文提出基于防屈曲支撑的新型导管架大型风机结构。

3 防屈曲支撑有限元模型

防屈曲支撑(Buckling Restrained Brace, BRB)克服了普通支撑受压屈曲的缺点,是一种轴向受压时能达到屈服而不屈曲的构件,其延性和滞回耗能能力高,兼有普通支撑和耗能构件的双重作用,为主体结构提供抗侧刚度的同时还能提供阻尼。普通支撑和 BRB 的受力过程及荷载-位移曲线关系如图 6 所示^[17]。

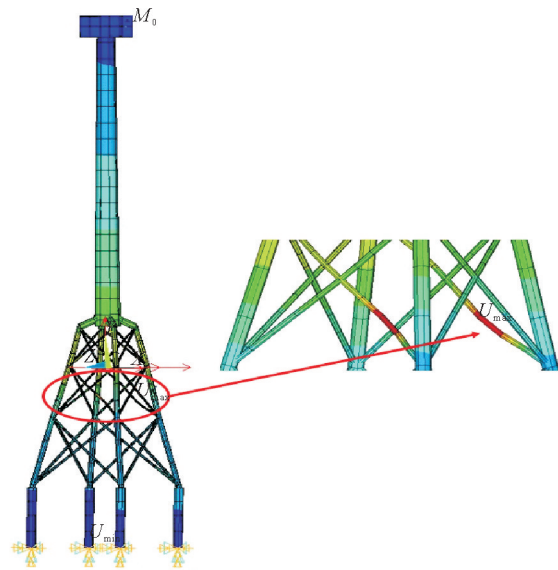


图 4 结构屈曲
U—位移

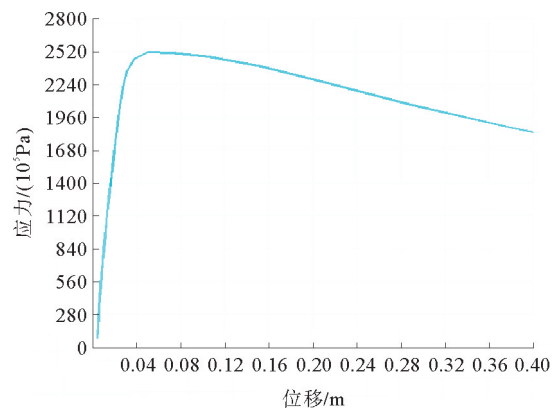


图 5 186 号节点应力-位移曲线

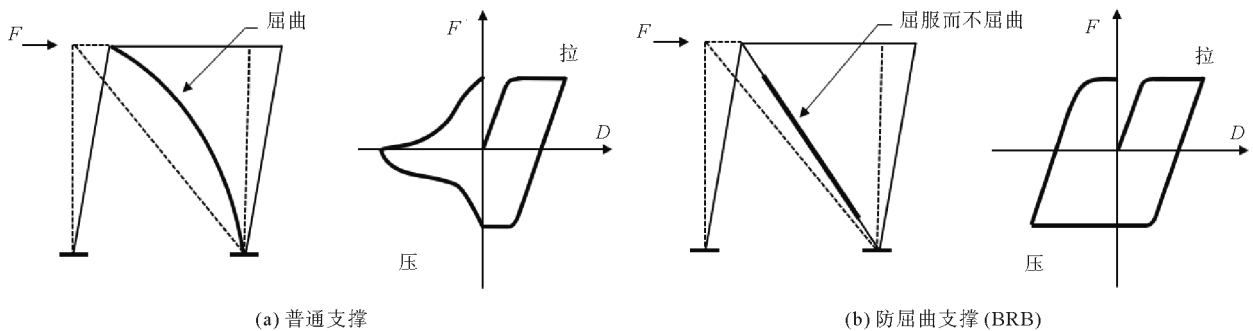


图 6 两类支撑受力过程及荷载-位移曲线关系

3.1 模型介绍

BRB 风机结构与原风机结构相似(下文简称 BRB 结构、原结构),仅需将图 3 中第二层前、后立面的受压支撑替换为 BRB。本文选用只承受轴向拉压荷载且不会出现屈曲失稳现象的 link8 单元简化模拟 BRB^[18]。为了充分发挥 BRB 延性和滞回耗能能力高的优势,选取屈服强度为 160 MPa 的低屈服点钢材^[19],其余材料属性与原结构相同。用 BRB 代替原来的杆件需遵循的原则就是替换的 BRB 承载能力要

和原来杆件承载能力保持相当,其中 BRB 内核单元的截面面积可利用式(1)确定^[20]。钢材本构选用考虑包辛格效应的双线性随动强化模型(BKIN)^[21],取剪切模量 $E_t=0.03E$,其应力-应变关系如图 7 所示。

$$A_1 = \frac{P_d}{\phi f_c} \quad (1)$$

式中: P_d 为 BRB 支撑设计承载能力; f_c 为钢材屈服点; ϕ 为安全系数, $\phi=0.9$ 。

对 BRB 结构进行模态分析,原结构和 BRB 结构的前 7 阶振型特征和自振频率见表 4。由表 4 可知,两个结构的振型特征保持一致,但频率稍有变化。由于 BRB 选用了低屈服点的钢材,因此需要更大的截面面积来保持与原支撑相同的承载能力,这将导致结构的刚度增大,其频率也随之增大。

3.2 模型验证

为验证 BRB 有限元模拟的正确性,本文选用文献[22]单根 BRB 低周往复加载试验的研究成果,采用相同的加载制度及边界条件,进行有限元对比分析,滞回曲线对比结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,数值模拟的结果与文献[22]试验结果较为接近,表明本文选取的材料模型能够较为准确地模拟 BRB 复杂的滞回受力特性。

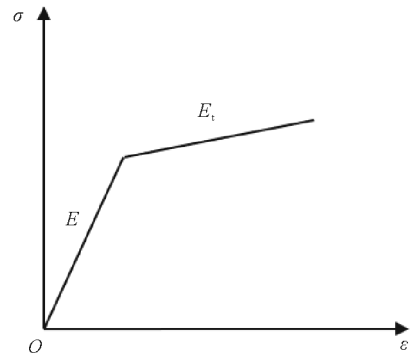


图 7 钢材应力-应变曲线

表 4 前 7 阶频率及振型特征

阶数/阶	振型特征	自振频率/Hz	
		原结构	BRB 结构
1	XY 面内变形	0.2401	0.2404
2	ZY 面内变形	0.2402	0.2405
3	XY 面内变形	1.6239	1.6252
4	ZY 面内变形	1.6410	1.6563
5	XY 面内变形	2.5312	2.5367
6	ZY 面内变形	2.5763	2.5940
7	Y 内扭转变形	2.9830	2.9885

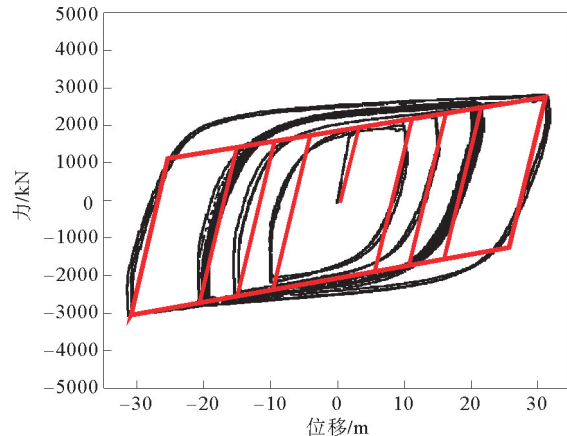


图 8 滞回曲线对比

—文献[22]试验数据; —有限元数值模拟

4 结构的模态分析及冰激动力响应

4.1 冰荷载确定

该海上风机的导管腿属于直立结构,海冰与直立结构相互作用的主要破坏模式是挤压破坏,因此在 ANSYS 有限元分析中选取 3 条挤压冰(Push1, Push2, Push3)进行动力响应分析。3 条挤压冰时程由渤海石油公司在导管腿直径为 1.2 m 的海洋平台上实测而得,风机导管腿直径为 1.65 m,根据渤海极值静冰力计算公式(2)看出风机所受冰力的大小与导管腿直径成正比关系^[23-24]。按该海域 100 年一遇的设计冰况,得出导管架单腿所承受的极值静冰力为 9699 kN,冰力作用类型见表 5,调整峰值后的冰力时程如图 9 所示。

$$F = 3.57m\sigma_c D^{0.5} h^{1.1} \quad (2)$$

式中: m 为形状系数,圆截面取值 0.9; σ_c 为海冰的单轴压缩强度,MPa; D 为导管腿直径, m; h 为冰厚, m。

表 5 冰力作用类型

冰力作用点	冰力时程类型	重现期/a	冰厚/cm	等效后最大冰力/kN
EL+0.0	挤压	100	100	9699

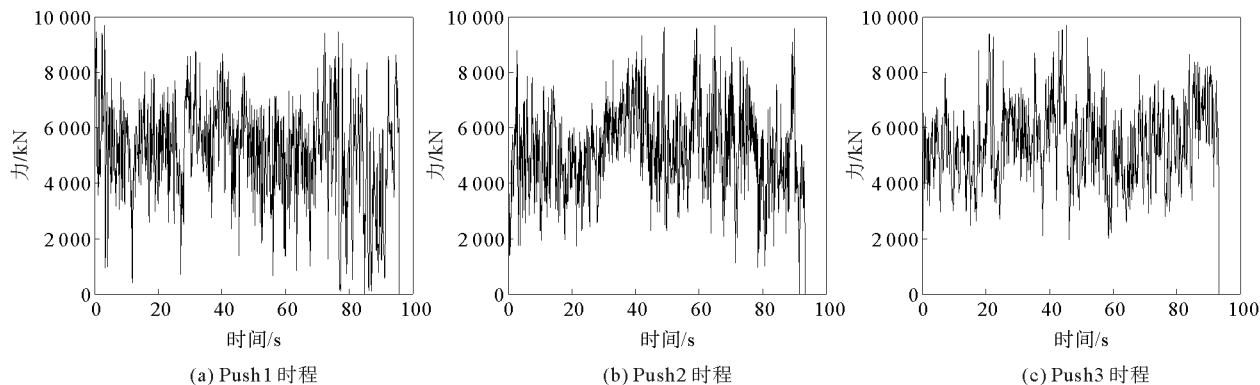


图 9 挤压冰时程

4.2 挤压冰作用下风机结构冰激振动响应

在图 9 所示的挤压冰作用下分别对施加了初始缺陷的原结构和 BRB 结构进行冰激振动分析,提取塔筒顶端、导管架顶端以及桩腿顶端三个关键位置的位移、加速度响应数据,其动力响应结果见表 6。

表 6 结构冰激振动反应

挤压冰力	结构类型	关键位置动力响应峰值					
		塔筒顶端		导管架顶端		桩腿顶端	
		位移/m	加速度/(m·s ⁻²)	位移/m	加速度/(m·s ⁻²)	位移/m	加速度/(m·s ⁻²)
Push1	原结构	0.660	6.090	0.379	23.920	0.228	14.040
	BRB 结构	0.608 (7.88)	4.869 (20.05)	0.314 (17.15)	19.470 (18.60)	0.192 (15.79)	11.650 (17.02)
Push2	原结构	0.555	5.590	0.284	16.510	0.166	10.320
	BRB 结构	0.543 (2.16)	4.213 (24.63)	0.255 (10.21)	12.200 (26.10)	0.155 (6.63)	8.144 (21.09)
Push3	原结构	0.762	4.449	0.292	15.570	0.175	8.604
	BRB 结构	0.703 (7.74)	3.420 (23.13)	0.260 (10.96)	12.470 (19.91)	0.159 (9.14)	7.311 (15.03)

注:表中括号内各数值为减振效果(%)=(原结构响应- BRB 结构响应)/原结构响应×100%

由表 6 可知, BRB 结构的冰激振动响应明显小于原结构的冰激振动响应,不论是位移还是加速度均降低明显,尤其关键位置的加速度减振效果更为显著。由此可以看出 BRB 结构可以有效地减小海上导管架风机结构的冰激振动响应,具有较好的抗冰激振动效果。

BRB 采用屈服应力较低的钢材,能够在主体结构构件发生屈服之前先行屈服耗能,给结构附加侧向刚度的同时还增大了结构的阻尼,保护主体结构免遭冰激破坏,从而使得 BRB 结构的冰激振动响应小于原结构。

5 结论

1) 对导管架风机有限元模型进行模态分析,将低阶固有频率与原风机结构的基频(0.24~0.25 Hz)进行对比,其结果均在合理范围内,从而验证了建模方法的正确性。

2) 对原结构进行线性屈曲分析,发现导管架第二层的受压斜撑变形过大,后对该风机结构进行非线性屈曲分析,提取第二层支撑变形最大节点的位移-应力曲线,发现该层支撑遭受极端冰荷载时易发生屈曲破坏。为防止支撑发生屈曲破坏,造成海上风机破坏,提出了新型 BRB 风机结构。

3) 对 BRB 结构进行模态分析,与原结构模拟结果进行对比,结果表明两个结构的振型特征保持一致,但频率稍有变化。由于 BRB 选用了低屈服点的钢材,因此需要更大的截面面积来保持与原支撑相同的承载能力,进而提高了结构的刚度,因此 BRB 结构的频率较原风机结构的频率略有提高。

4) 利用 ANSYS 建立 BRB 有限元模型,选用文献[22]的研究成果,采用同样的加载制度及边界条件,进行有限元对比分析。结果表明数值模拟的结果与试验结果较为接近,表明本文选取的材料模型能够较为准确地模拟 BRB 复杂的滞回受力特性。

5) 通过对替换 BRB 前后的风机结构在不同挤压冰荷载作用下的时程响应进行研究,发现 BRB 结构在不同挤压冰荷载作用下,均可以减小关键位置的峰值位移、峰值加速度,尤其在 Push2 作用下的减振效果更为明显,结构振动响应甚至可减小 26% 以上。这不仅解决了普通支撑易失稳的问题,而且还提高了风机结构的抗冰性能。该研究成果为其他同类型海上风机结构设计与研究工作提供了参考。

参考文献(References):

- [1] 刘吉臻,马利飞,王庆华,等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学,2021,23(1):149-159.
LIU Jizhen, MA Lifei, WANG Qinghua, et al. Thoughts on offshore wind power supporting China's energy transformation and development[J]. Engineering Science, 2021, 23(1): 149-159.
- [2] 马玉贤. 渤海海域海上风电工程结构冰激振动研究[D]. 天津:天津大学,2016.
MA Yuxian. Study on ice cream vibration of offshore wind power engineering structure in Bohai Sea[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [3] 刘佰琼,徐敏,刘晴. 我国海上风电发展的主要问题及对策建议[J]. 海洋开发与管理,2015,32(3):7-12.
LIU Baiqiong, XU Min, LIU Qing. The main problems and countermeasures of offshore wind power development in China[J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(3): 7-12.
- [4] 王译鹤. 冰激窄体结构振动的机理与理论模型研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
WANG Yihe. Study on the mechanism and theoretical model of vibration of ice cream narrow body structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [5] BARKER A, TIMCO G, GRAVESEN H, et al. Ice loading on Danish wind turbines, Part 1: Dynamic model tests[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41(1): 1-23.
- [6] GRAVESEN H, SORENSEN S L, VOLUND P, et al. Ice loading on Danish wind turbines, Part 2: Analysis of dynamic model test results[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41(1): 25-47.
- [7] 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 Dayong, WANG Guojun, WANG Shuaifei, et al. Analysis of anti-ice performance of offshore wind power foundation in ice area[J]. Ship Mechanics, 2018, 22(5): 615-627.
- [8] 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. Ice cream vibration analysis of single-column three-pile offshore wind power structure in Bohai Sea[J]. Ocean Engineering, 2016, 34(5): 1-10.
- [9] 闯振菊,李春郑,宋础,等. 导管架式一体化风机在冰载荷作用下的耦合响应研究[J]. 船舶力学,2021,25(8):1095-1105.
CHUANG Zhenju, LI Chunzheng, SONG Chu, et al. Study on coupling response of jacket integrated wind turbine under ice load[J]. Ship Mechanics, 2021, 25(8): 1095-1105.
- [10] 赵聪杰. 台风环境下导管架式海上风机响应分析及易损性评估[D]. 重庆:重庆大学,2021.
ZHAO Congjie. Response analysis and vulnerability assessment of jacket offshore wind turbine under typhoon environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [11] YAN Y, LI C, LI Z. Buckling analysis of a 10 MW offshore wind turbine subjected to wind-wave-earthquake loadings[J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109452.
- [12] PATIL A, JUNG S, KWON O S. Structural performance of a parked wind turbine tower subjected to strong ground motions[J]. Engineering Structures, 2016, 120: 92-102.
- [13] NB/T 10105—2018, 海上风电场工程风电机组基础设计规范[S].
NB/T 10105—2018, Code for basic design of wind turbines for offshore wind farm engineering[S].

- [14] 张洪达,王勇,赵华,等. 6 MW 海上风机近海多桩式平台动力特性研究[J]. 山东电力技术,2022,49(6):74-80.
ZHANG Hongda,WANG Yong,ZHAO Hua,et al. Dynamic characteristics of offshore multi-pile platform for 6 MW offshore fan[J]. Shandong Electric Power Technology,2022,49(6):74-80.
- [15] 于通顺. 海上风电筒型基础结构与地基动力响应分析研究[D]. 天津:天津大学,2011.
YU Tongshun. Analysis of offshore wind turbine type infrastructure and foundation dynamic response[D]. Tianjin:Tianjin University,2011.
- [16] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 5版. 北京:科学出版社,2011.
CHEN Ji. Stability theory and design of steel structures[M]. 5th ed. Beijing: Science Press,2011.
- [17] 周云,唐荣,钟根全,等. 防屈曲耗能支撑研究与应用的最新进展[J]. 防灾减灾工程学报,2012,32(4):393-407.
ZHOU Yun,TANG Rong,ZHONG Genquan,et al. New progress in the research and application of buckling energy dissipation support[J]. Chinese Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2012,32(4):393-407.
- [18] 马云. 全钢防屈曲支撑及其钢框架结构抗震性能与设计方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
MA Ning. Seismic performance and design method of all-steel buckling support and steel frame structure[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2010.
- [19] 漆启明,邵长江,黄辉,等. 基于 BRB 的铁路双柱式超高墩连续梁桥横向减震研究[J]. 振动与冲击,2022,41(7):182-192.
QI Qiming,SHAO Changjiang,HUANG Hui,et al. Study on lateral shock absorption of railway double-column ultra-high pier continuous girder bridge based on BRB[J]. Journal of Vibration and Shock,2022,41(7):182-192.
- [20] 宁海勳. 防屈曲支撑钢框架结构抗震性能研究[D]. 太原:太原理工大学,2018.
NING Haimeng. Research on seismic behavior of buckling restrained braced steel frame structure[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2018.
- [21] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
WANG Xinmin. Numerical analysis of ANSYS engineering structure[M]. Beijing: China Communications Press,2007.
- [22] 刘超. 软钢阻尼器的滞回性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
LIU Chao. Study on hysteretic performance of mild steel damper[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2013.
- [23] SY/T 10030—2004, 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法(工作应力设计法)[S].
SY/T 10030—2004, Recommended practice for planning, design and construction of offshore fixed platforms (working stress design method) [S].
- [24] Q/HSn 3000—2002, 中国海冰条件及应用规定[S].
Q/HSn 3000—2002, Regulations for offshore ice condition & application in China Sea[S].

(责任编辑 姜锡方;英文校审 程文华)