

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.015

冰区单桩海上风机结构 B-TMD 减振控制数值模拟

孔德福¹, 李光明², 李唯一¹, 崔泽凯¹, 俞华锋³, 陈 达¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中广核新能源控股有限公司, 北京 100070;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要: 采用渤海 18 号冰区实测数据, 以 NREL 5 MW 单桩海上风机结构为例, 采用 ANSYS 有限元软件建立风机模型, 分析了调谐质量阻尼器(TMD)和双向调谐质量阻尼器(B-TMD)对风、海冰、海流荷载联合作用下单桩海上风机结构双向振动响应的减振效果。结果表明: B-TMD 对塔筒能够起到双向控制作用, 同时降低了面外和面内风机塔筒的振动响应, 对于塔筒的控制效果更好; B-TMD 对塔筒顶端面外和面内位移控制效果随着质量比增大而提高, 受风冰角影响不大; B-TMD 鲁棒性较差, 面外和面内的阻尼器参数分配极易影响控制效果, 当面外和面内阻尼器参数相同时, B-TMD 能够发挥最优的控制效果。

关键词: 单桩海上风机; 荷载作用; 振动控制; 双向调谐质量阻尼器

中图分类号: TK83 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)03-0118-09

Numerical simulation of B-TMD vibration reduction control of monopile offshore wind turbine structure in ice coverage areas

KONG Defu¹, LI Guangming², LI Weiyi¹, CUI Zekai¹, YU Huafeng³, CHEN Da¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. CGN New Energy Holdings Co., Ltd., Beijing 100070, China;
3. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311100, China)

Abstract: The measured data of the Bohai Sea No. 18 ice coverage area was selected, and a wind turbine model was established based on the NREL 5 MW monopile offshore wind turbine (OWT) structure by ANSYS finite element software. The vibration reduction effects of tuned mass dampers (TMDs) and bidirectional tuned mass dampers (B-TMDs) on the bidirectional vibration response of monopile OWT structures under the combined action of wind, sea ice, and ocean current loads were analyzed. The results indicate that B-TMD can play a bidirectional control role for the tower and reduce the vibration responses of the wind turbine tower both outside and inside the plane, and it has a better control effect on the tower cylinder. The control effect of B-TMD on the out-of-plane and in-plane displacements at the top of the tower improves with the increase of the mass ratio and is not greatly affected by the wind-ice angle. The robustness of B-TMD is relatively poor, and the distribution of damper parameters inside and outside the plane can easily affect the control effects. When damper parameters inside and outside the plane are the same, the B-TMD could exert optimal control effects.

Key words: monopile offshore wind turbine; load effect; vibration control; B-TMD

海上风能作为一种清洁无污染的可再生资源, 在世界各国备受关注。渤海空气和风能密度高, 是我国发展北方海上风电的重点海域, 然而渤海作为我国纬度最高的海域, 每年冬季受强烈而稳定的蒙古冷高压影响, 海面会产生不同程度的结冰现象^[1]。海上风机基础结构塔筒一般较高, 属于柔性结构, 而在多数结冰海域海冰荷载为主要控制荷载, 整体结构在海冰荷载作用下会产生冰激振动^[2-3], 强烈的振动会降低海上风机发电效率, 影响风机的正常运行, 严重时甚至还会导致风机结构破坏。此外, 由于海冰运动易受海流和海风影响, 海冰运动方向往往与风荷载成一定的夹角, 风、海冰、海流荷载联合作用下, 风机塔筒在叶片旋转平面

作者简介: 孔德福(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事海上风机振动控制与响应研究。E-mail: kdf10086@163.com

通信作者: 陈达(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构减振、防腐与防灾研究。E-mail: chenda@hhu.edu.cn

引用本文: 孔德福, 李光明, 李唯一, 等. 冰区单桩海上风机结构 B-TMD 减振控制数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 118-126.

KONG Defu, LI Guangming, LI Weiyi, et al. Numerical simulation of B-TMD vibration reduction control of monopile offshore wind turbine structure in ice coverage areas[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 118-126.

外(面外)和平面内(面内)均会发生不同程度的振动^[4],因此需要对海上风机基础结构的面外和面内同时进行振动控制以确保其安全性。

对于海上风机基础结构的振动控制主要使用被动式阻尼器^[5],采用的被动式阻尼器主要有调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)、双向调谐质量阻尼器(bi-directional tuned mass damper, B-TMD)、多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass damper, MTMD)和三维摆式阻尼器(three-dimensional pendulum tuned mass damper, 3D-PTMD)等。TMD 是目前研究较多且对单向振动响应控制效果较好的被动式阻尼器,但其对双向振动响应的控制效果还不明晰^[6];B-TMD 在风荷载或地震荷载作用下均对风机基础结构有较好的减振效果,而关于 B-TMD 控制联合环境荷载(风、海冰、海流荷载等)作用下结构振动响应的研究较少^[7-8]。

目前大直径单桩设备和施工技术比较成熟,具有结构较为简单、占用面积小、承载力高、沉降量小且均匀、适用范围广等特点,常是工程首选,在海上风电基础中占比高达 60% 以上^[9]。本文以 NREL 5 MW 单桩海上风机结构为例,建立简化的梁杆有限元模型,采用 TMD 和 B-TMD 两种阻尼器开展单桩海上风机基础结构在风、海冰、海流荷载联合作用下的结构振动控制研究,对比分析 TMD 和 B-TMD 对结构双向振动响应的减振效果。

1 冰区风机动力平衡方程

单桩海上风机动力特性研究主要集中在动力荷载作用下结构的位移、速度及加速度等随时间的变化规律。风、海冰、海流荷载联合作用下,其动力平衡方程为^[10]

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_w + F_i + F_e$$
 (1)

式中: M 为结构质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; $x, \dot{x}, \ddot{x}$ 分别为位移、速度和加速度向量; F_w, F_i, F_e 分别为风荷载、海冰荷载和海流荷载。

2 风、海冰、海流荷载模拟

2.1 脉动随机风荷载

目前工程中常用的风切变模型有指数模型和对数模型两种。由于指数模型计算的风速值与实测值偏差较小^[11],且在工程中应用较多,本文选用指数模型计算平均风速:

$$\bar{v}_z/\bar{v}_{z_s} = (z/z_s)^{\alpha_1}$$
 (2)

式中: $\bar{v}_z$ 为高度 z 处的平均风速, m/s; $\bar{v}_{z_s}$ 为参考高度 z_s 处的平均风速, m/s, 按《海上固定平台入级与建造规范》的规定,以海面以上 10 m 处的风速作为标准进行换算; z_1 为风速点距地面高度, m; z_s 为参考风速点距地面高度; α_1 为风切变系数,主要受表面粗糙度影响,取 0.14。

脉动风速的模拟可以通过功率谱法实现。常用的脉动风功率谱包括 Davenport 谱、Von Karman 谱、Harris 谱和 Kaimal 谱^[12]。通过对比经验脉动风谱与实测脉动风谱,发现 Davenport 风速谱能够较好地拟合渤海现场风速^[13],因此选用 Davenport 谱模拟脉动风速。

由于 ANSYS 中无法直接模拟并生成包含脉动风作用的风场,本文根据线性滤波法,通过 Matlab 编程模拟生成各加载点处的脉动风速^[14],瞬时风荷载则参考 API RP 2A-WSD—2014《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)》计算。

2.2 风机荷载

参考挪威船级社规范 DNV-OS-J101—2013 *Design of Offshore Wind Turbine Structures*,当考虑荷载联合作用效应,并且该联合作用效应中包含风荷载时,应分别考虑风机正常运行与紧急停机两种不同的工作状态。本文仅考虑风机正常运行下的气动荷载,并且不考虑叶片的振动响应,采用 JB/T 10300—2001《风力发电机组设计要求》中的方法计算气动荷载,得到额定风速下风机推力为 900.26 kN,扭矩为 4 180.07 kN·m。

2.3 海流荷载

海流是一种较为稳定的水流运动,圆柱形构件单位长度上受到的海流荷载 f_c 为

$$f_c = \rho_w C_D D v_{\max}^2 / 2$$
 (3)

式中: ρ_w 为海水密度,取 1030 kg/m³; C_D 为阻力系数,取 1.2; D 为圆柱形构件直径, m; $v_{\max}$ 为海流的最大可

能流速, m/s。

本文海流荷载采用 ANSYS 中的 PIPE59 单元模拟, 通过其自带的 Water Table 可定义海洋环境参数, 计算杆件受到的海流荷载, 实现海洋环境下的流体效应模拟。由于计算得到的波流耦合作用力会受到波浪相位角变化的影响, 在动力响应特性分析时将波浪相位角改为 0° , 可实现不同相位角下海流荷载的施加。

2.4 海冰荷载

海冰荷载与结构间的相互作用是一个耦合过程, 可分为静冰荷载和动冰荷载, 其中静冰荷载可能将结构推倒, 动冰荷载会引起结构振动, 振动模式根据冰速的不同可分为准静态振动、稳态振动和随机振动, 本文选用冰区平均冰速 0.6 m/s , 位于高冰速区间, 结构动力响应以随机振动为主^[15], 采用 Kärnä 等^[16] 根据渤海实测数据建立的随机冰力谱来模拟随机海冰荷载。

3 有限元模型构建

3.1 海上风机模型

以近海风机中具有代表性的 NREL 5 MW 风机作为研究对象, 该风机叶片旋转直径为 126 m 、质量为 17.74 t , 轮毂半径为 1.5 m 、质量 56.78 t ; 机舱安装高度为 90 m , 总质量为 240 t ; 下部单桩基础入泥深度为 36 m , 过渡段高程为 10 m ; 塔筒采用锥形变截面, 底部直径为 6 m 、壁厚为 35.1 mm , 塔顶直径为 3.87 m 、壁厚 35 mm , 其他设计参数见文献[17]。结构各部件高程如图 1(a) 所示。

采用 ANSYS 建立该单桩风机结构有限元模型, 如图 1(b) 所示, 其中叶片、机舱和轮毂等部件的简化质量以及 TMD、B-TMD 的质量块采用 MASS21 单元模拟; TMD、B-TMD 的弹簧和阻尼器采用 COMBIN14 单元模拟; 上部塔筒部分采用 SHELL181 单元模拟; 上部塔筒与下部基础桩之间的连接段采用 BEAM188 单元模拟; 泥面线以上桩采用 PIPE59 单元模拟, 以下桩采用 PIPE16 单元模拟; 桩土效应通过 COMBIN39 单元模拟; 采用 CONTA175 单元和 TARGE170 单元实现多点约束解决塔筒和塔筒连接段之间存在的单元不同、网格不连续的问题。 p - y 曲线法能够较好模拟水平荷载作用下的桩土响应特性^[18], 因此桩土作用采用 p - y 曲线法模拟, 表 1 为渤海渤中地区地质参数和 p - y 曲线计算相关参数^[19], 图 2 为部分土层桩体相互作用 p - y 曲线(p 为泥面线以下 z 处桩身侧向承载力, y 为泥面线以下 z 处桩身侧向位移; 图中 z 为泥面线以下深度, θ 为风冰角), 结构各部分材料均采用 DH36。

表 1 渤海渤中地区地质参数和 p - y 曲线计算相关参数

Table 1 Geological parameters and p - y curve calculation-related parameters in Bozhong area of Bohai Sea										
土层编号	土层	厚度/m	浮容重/(kN/m^3)	内摩擦角/($^{\circ}$)	C_1	C_2	C_3	K/kPa	C_u/kPa	ε_c
第 1 层	黏土	1.0	9.2	10~12					22	0.02
第 2 层	淤泥质黏土	6.5	8.4	5~8					21	0.02
第 3 层	粉质黏土	5.3	9.8	12~14					27	0.01
第 4 层	细砂	9.7	8.8	28~30	1.8	2.4	28	5 120		
第 5 层	黏土	5.5	9.2	10~12					22	0.02
第 6 层	细砂	8.0	8.8	28~30	1.8	2.4	28	5 120		

注: C_1 、 C_2 、 C_3 为与土体内摩擦角有关的系数; K 为土体侧向抗力初始模量; C_u 为原状黏土不排水抗剪强度; ε_c 为土体三轴不排水压缩试验中对应于 0.5 倍最大主应力的竖向压缩应变值。

3.2 特征频率

采用 Block Lanczos 法对结构进行模态分析, 求得结构前六阶固有频率。前六阶振型如图 3 所示, 对应的模态振型数据见表 2。

风机模型切入转速为 6.9 r/min , 切出转速为 12.1 r/min , 由此求出对应的 1 倍叶轮旋转频率 ($0.12\sim 0.20\text{ Hz}$) 与 3 倍叶轮旋转频率 ($0.35\sim 0.61\text{ Hz}$), 结构固有频率应该与 1 倍和 3 倍叶轮旋转频率至少相差 5%

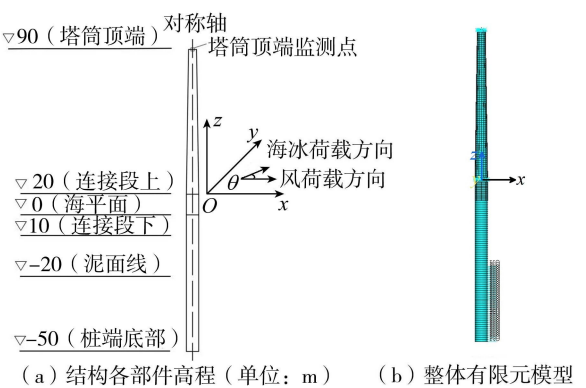


图 1 单桩风机各部件高程和有限元模型
Fig. 1 Elevation and finite element model of each component of monopile OWT

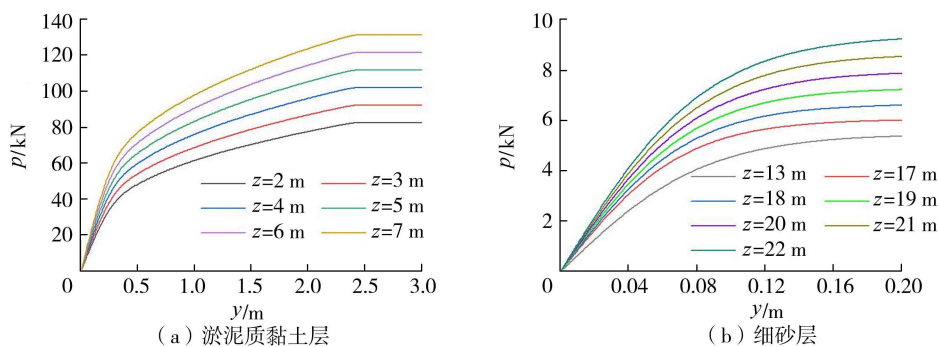


图 2 部分土层桩体相互作用 p - y 曲线

Fig. 2 p - y curve for interaction between piles in specific soil layers

以上^[20],因此结构的固有频率应避开 0.11~0.21 Hz 和 0.33~0.64 Hz。在结构设计过程中,通常将一、二阶固有频率作为校核标准,由模态分析结果可知,结构一、二阶固有频率均为 0.254 Hz,避开了危险区间,不会与风机发生共振,模型设计合理。

3.3 TMD 与 B-TMD 参数

采用 Den Hartog 提出的参数优化方法,TMD 与 B-TMD 可采用相同的参数优化公式^[8],最优频率比 f_{opt} 、阻尼比 ζ_{opt} 、等效弹簧刚度 K_{opt} 和阻尼系数 C_{opt} 分别为^[21]

$$f_{\text{opt}} = 1/(1 + \mu)$$
 (4)

$$\zeta_{\text{opt}} = \sqrt{3\mu/8(1 + \mu)}$$
 (5)

$$K_{\text{opt}} = m(2\pi f_{\text{T}})^2$$
 (6)

$$C_{\text{opt}} = 4m\pi f_{\text{T}}\zeta_{\text{opt}}$$
 (7)

式中: μ 为 TMD 或 B-TMD 质量 m 和结构总质量 M 的比值(质量比); f_{T} 为 TMD 的振动频率,Hz。

为了便于对比两种阻尼器的减振效果,采用相同质量比^[22],具体参数见表 3(阻尼器参数均为平均分配),TMD、B-TMD 建模位置均在塔筒 89 m 处,TMD 建模采用质量单元通过 COMBIN14 单元与塔筒连接,当弹簧单元设置为 x 向时控制塔筒一阶面外(x 向)位移,当弹簧单元设置为 y 向时控制塔筒二阶面内(y 向)位移,B-TMD 在 x 、 y 向同时设置,可同时控制塔筒面外与面内位移。

3.4 分析工况

采用渤海 18 号冰区实测数据对 NREL 5 MW 风机的结构振动控制进行研究,海冰抗压强度为 2.16 MPa,一年一遇冰厚为 9.8 cm,百年一遇冰厚为 37.0 cm,平均冰速为 0.6 m/s。考虑百年一遇海冰环境条件,对不同质量比阻尼器以及不同环境荷载组合作用下的风机振动响应进行分析。计算时选 10 m 高度处平均风速 40.15 m/s,海水密度为 1 030 kg/m³,海流表层流速与冰速一致,中部流速为 0.78 m/s,底层流速为 0.56 m/s,风荷载、海流荷载作用方向为 x 轴正向,考虑 4 种不同风冰角(风荷载作用方向与海冰荷载作用方向的夹角,见图 1(a))和每种风冰角下对应 TMD、B-TMD 的 5 种质量比,共 40 种工况,如表 4 所示(工况编号中数字代表质量比,字母代表风冰角)。TMD 在同一工况中有两种弹簧单元设置,分别对应面外和面内。

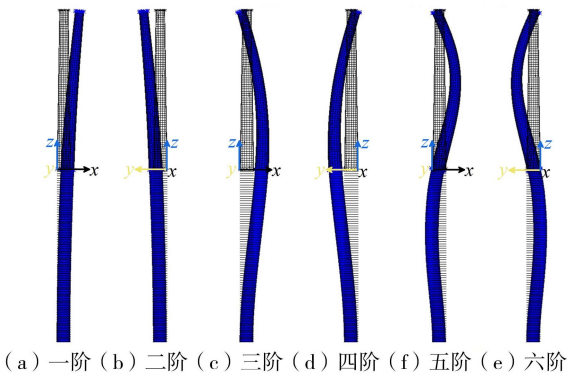


图 3 单桩风机结构前六阶振型

Fig. 3 First six-order vibration modes of monopile OWT structure

表 2 单桩风机结构前六阶特征频率

Table 2 First six-order characteristic frequencies of monopile OWT structure

阶数	频率/Hz	周期/s	振型描述
1	0.254	3.941	x 向
2	0.254	3.941	y 向
3	1.346	0.743	x 向
4	1.346	0.743	y 向
5	4.006	0.250	扭转
6	4.006	0.250	扭转

表 3 阻尼器参数设置

Table 3 Parameters of dampers

$\mu/\%$	f_{opt}	ζ_{opt}	$K_{\text{opt}}/(\text{N/m})$	C_{opt}
1	0.99	0.06	43 344.59	3 554.67
2	0.98	0.09	84 997.73	9 906.64
3	0.97	0.10	125 032.95	17 935.27
4	0.96	0.12	163 520.04	27 215.84
5	0.95	0.13	200 525.26	37 493.23

模拟过程中将塔筒及支撑立柱沿高度均匀分为16段,每段5 m,在每段的中心高度处设置随机风荷载的加载点,最低和最高加载点高度分别为12.5、87.5 m。图4为部分风、海冰荷载模拟结果,可见风荷载与海冰荷载功率谱密度曲线与目标谱曲线基本吻合,模拟结果较为可靠。

表4 风、海冰、海流荷载联合作用下结构振动控制工况

Table 4 Vibration control conditions of monopile OWT structure under combined wind, sea ice and current loads

$\mu/\%$	工况编号			
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$
1	TMD1A,B-TMD1A	TMD1B,B-TMD1B	TMD1C,B-TMD1C	TMD1D,B-TMD1D
2	TMD2A,B-TMD2A	TMD2B,B-TMD2B	TMD2C,B-TMD2C	TMD2D,B-TMD2D
3	TMD3A,B-TMD3A	TMD3B,B-TMD3B	TMD3C,B-TMD3C	TMD3D,B-TMD3D
4	TMD4A,B-TMD4A	TMD4B,B-TMD4B	TMD4C,B-TMD4C	TMD4D,B-TMD4D
5	TMD5A,B-TMD5A	TMD5B,B-TMD5B	TMD5C,B-TMD5C	TMD5D,B-TMD5D

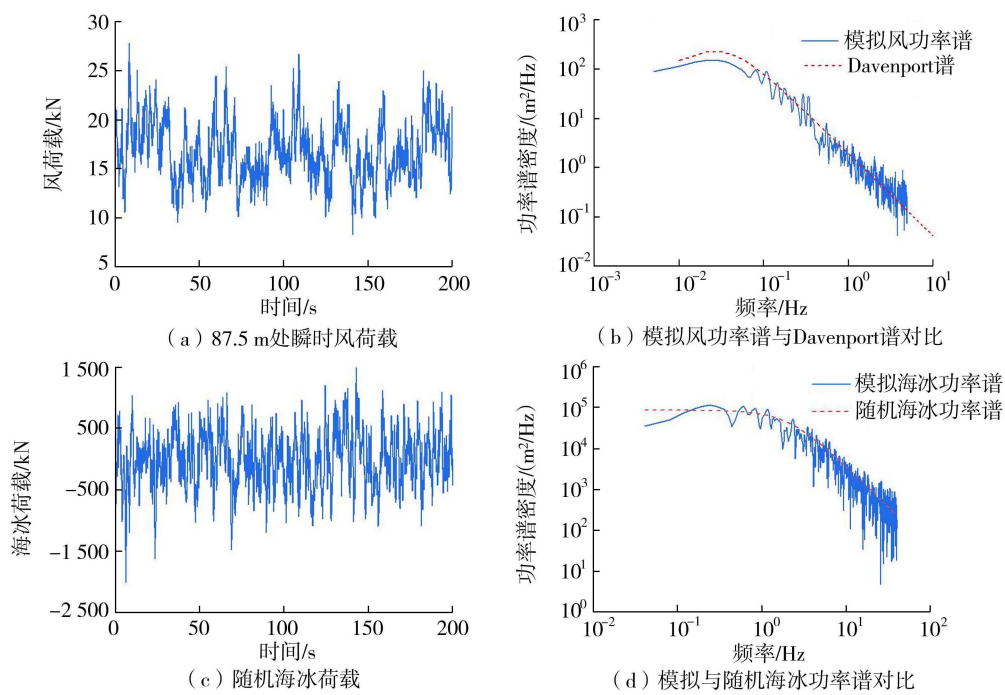


图4 部分风、海冰荷载模拟结果

Fig. 4 Simulation results of partial wind and sea ice loads

4 结果与分析

选取塔筒最高位置(90 m)为塔筒顶端,提取面外(x 向)和面内(y 向)位移进行响应分析。限于篇幅,以TMD5D和B-TMD5D工况为例进行分析。

4.1 位移响应时域分析

取荷载步长为0.1 s,计算时长为200 s,计算得到塔筒顶端的面外和面内位移响应(B-TMD控制下塔筒顶端面外位移与 x 向TMD对比,面内位移与 y 向TMD对比)。图5为TMD5D和B-TMD5D工况塔筒顶端的面外和面内位移响应曲线(NOTMD代表与TMD、B-TMD工况相同但未进行控制的工况)。

由图5可知,TMD5D和B-TMD5D工况下塔筒顶端面外位移峰值为1.4 m,位移平稳值约为0.8 m,与乐治济等^[23]模拟结果较为接近。塔筒顶端的面外位移响应峰值在TMD和B-TMD控制下快速衰减至振动微小的稳定响应,两者控制效果相当接近。面内位移响应峰值在B-TMD控制下部分时刻减小、部分时刻振动略有增大,总体来看位移减小时刻多于增大时刻,TMD控制下塔筒顶端面内位移部分时刻有一定减小,但位移减小幅度与B-TMD相比略小。综合分析可以看出,当TMD设置仅控制面内位移时,面外位移没有减小,对结构的面内位移减小起到了消极作用,因此相同参数下B-TMD对塔筒顶端面内位移控制效果更好;面内位移由于响应程度远小于面外位移,对TMD控制面外位移的效果影响较小,因此B-TMD与TMD对塔筒顶端面外位移控制效果接近。综上可见,B-TMD对塔筒起到了双向控制作用,在面外和面内同时降低了风机

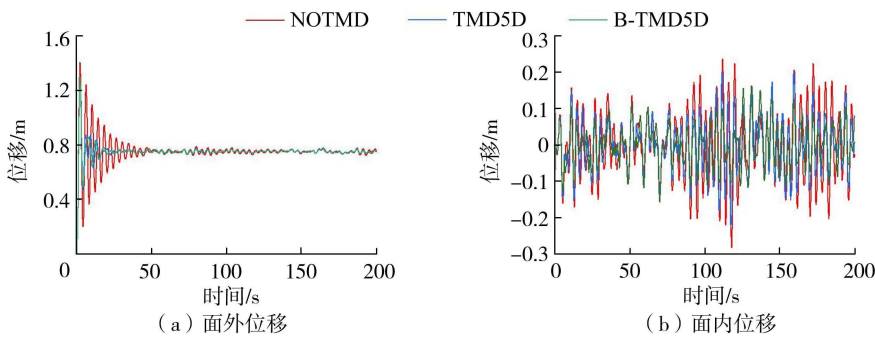


图 5 TMD5D 和 B-TMD5D 工况下塔筒顶端面外和面内位移响应

Fig. 5 Out-of-plane and in-plane displacement responses at tower top under TMD5D and B-TMD5D

塔筒的振动响应,对于塔筒顶端的整体控制效果更佳。

4.2 位移响应频域分析

为消除瞬态分析时初始效应的影响,取计算时间 10 s 后的风机塔筒顶端面外和面内位移结果,对其进行傅里叶变换,分析其频域特性^[4]。图 6 为 B-TMD5D 工况下塔筒顶端和 B-TMD 面外和面内位移频域响应,图 7 为 TMD5D 工况下塔筒顶端和 TMD 面外和面内位移频域响应。

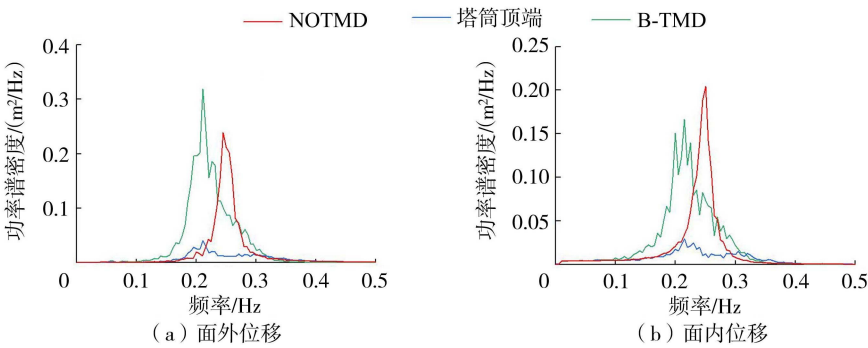


图 6 B-TMD5D 工况下塔筒顶端和 B-TMD 位移频域响应对比

Fig. 6 Comparison of displacement responses in frequency domain between tower top and B-TMD under B-TMD5D

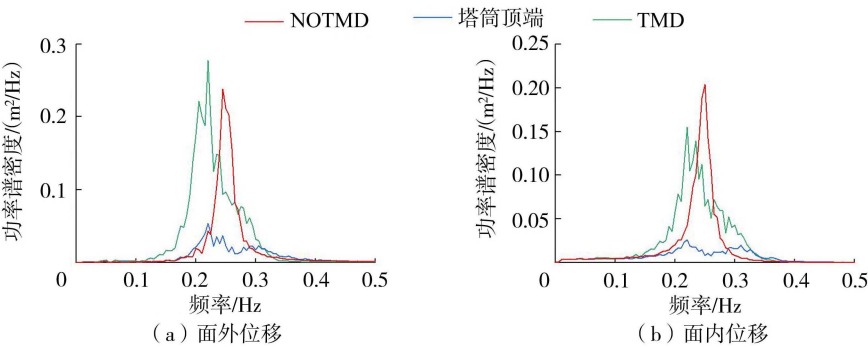


图 7 TMD5D 工况下塔筒顶端和 TMD 位移频域响应对比

Fig. 7 Comparison of displacement responses in frequency domain between tower top and TMD under TMD5D

由图 6(a)可知,B-TMD5D 工况下塔筒顶端面外位移峰值频率处能量密度相较无控制时大幅降低,且峰值频率由 0.254 Hz 调谐至 0.215 Hz 时减振效果显著,同时可以看出 B-TMD 与单桩风机结构的峰值频率相同。在塔筒顶端面内,B-TMD 控制下塔筒顶端面内位移峰值频率处能量密度大幅降低,峰值频率调谐至 0.215 Hz 时减振效果显著,调谐比为 1.0。可见 B-TMD 对结构具有良好的双向减振效果,并且调谐比与鲁正等^[22]研究的最佳调谐比相同,均为 1.0。由图 7 可知,TMD 控制下塔筒顶端面外和面内峰值频率处能量密度大幅降低,调谐比为 1.0。综合对比 B-TMD 与 TMD 控制下的位移频域响应,两者调谐比相同,但 B-TMD 的峰值频率更低,B-TMD 在峰值频率处以更大的能量密度,使得塔筒顶端在峰值频率处能量密度更小,B-TMD 在面外和面内同时协调作用,控制效果更优。

4.3 位移响应标准差分析

表 5 为风冰角为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 、B-TMD 质量比从 1%变化为 5%时,塔筒顶端面外和面内位移标准差相较无控制下的降低百分比。由表 5 可知,B-TMD 对塔筒顶端面外和面内位移控制效果均随着质量比的增大而提高,其中面外位移标准差最大降低 28.72%,面内位移标准差最大降低 22.53%。风冰角对面外和面内位移控制效果影响不大,相同质量比时,不同风冰角下面外和面内位移标准差降低百分比差值均不超过 2 个百分点,风冰角为 0° 时面内位移较小,位移标准差降低百分比没有参考性。因此,B-TMD 控制下塔筒顶端面外和面内位移标准差变化规律相同,均随质量比的增大而增大,风冰角对其影响较小。

表 5 风、海冰、海流荷载联合作用下塔筒顶端位移标准差

B-TMD 质量比/%	位移标准差降低百分比/%							
	$\theta=0^{\circ}$		$\theta=30^{\circ}$		$\theta=60^{\circ}$		$\theta=90^{\circ}$	
	面外	面内	面外	面内	面外	面内	面外	面内
1	7.53	18.40	7.63	4.91	7.95	5.13	7.82	5.25
2	14.31	34.58	14.44	10.03	14.83	10.33	14.32	10.51
3	19.83	46.18	20.01	14.54	20.43	14.84	19.62	15.03
4	24.37	54.74	24.57	18.56	24.99	18.84	23.95	19.02
5	28.11	61.09	28.32	22.11	28.72	22.36	27.54	22.53

4.4 阻尼器参数分配

由图 5 可知,B-TMD5D 工况下塔筒顶端面外和面内位移相差较大,NOTMD 在风冰角为 90° 时面外与面内的均方根位移分别为 0.76 m 和 0.09 m,而 B-TMD 在设置阻尼器参数(弹簧刚度与阻尼系数)时面外与面内为平均分配,由此考虑根据均方根位移对阻尼器参数在面外和面内的分配进行调整,面外取原阻尼器参数的 90%,面内取原阻尼器参数的 10%,探究 B-TMD 面外和面内阻尼器参数重新分配对塔筒顶端面外和面内位移的影响,图 8 和图 9 分别为 B-TMD5D 工况下阻尼器参数平均分配与阻尼器参数非平均分配时塔筒顶端面外和面内位移响应曲线及塔筒顶端和 B-TMD 面外和面内位移频域响应曲线。

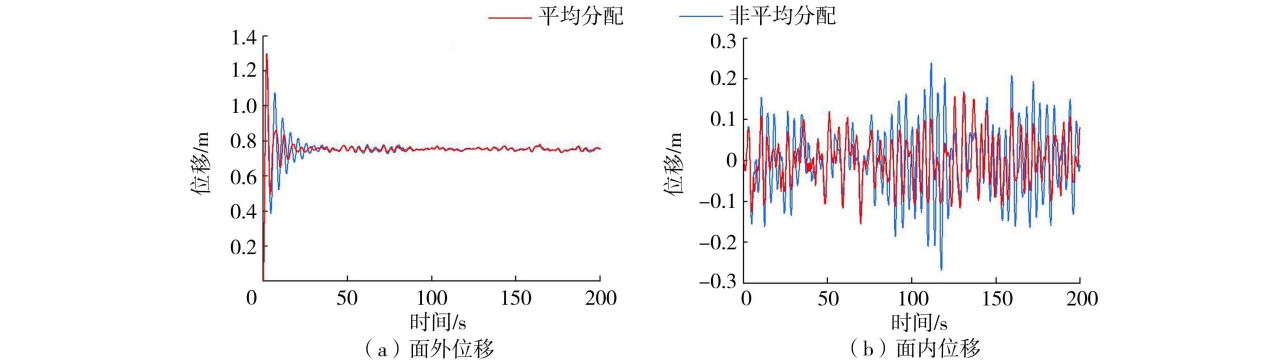


图 8 B-TMD5D 工况下阻尼器参数平均与非平均分配时塔筒顶端位移响应

Fig. 8 Displacement responses of tower top with averaged and non-averaged damper parameter distributions under B-TMD5D

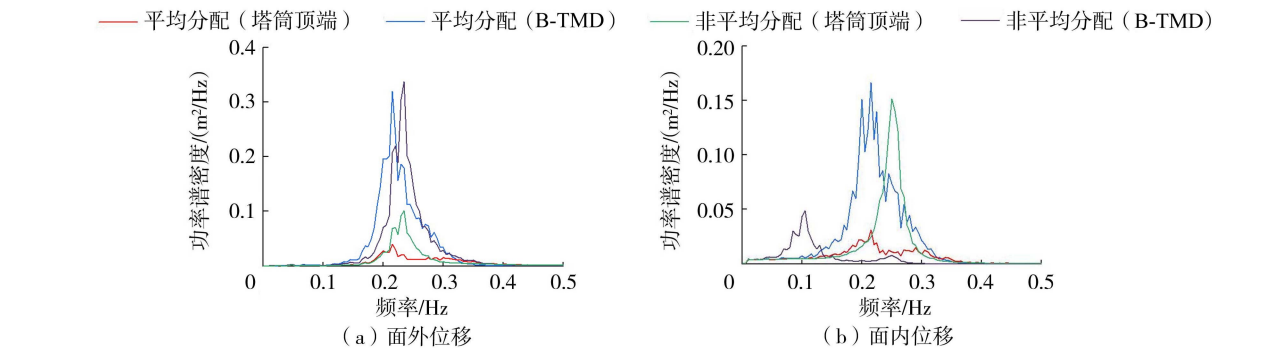


图 9 B-TMD5D 工况下阻尼器参数平均与非平均分配时塔筒顶端和 B-TMD 位移频域响应对比

Fig. 9 Comparison of displacement responses in frequency domain between tower top and B-TMD with averaged and non-averaged damper parameter distributions under B-TMD5D

由图 8 可知,阻尼器参数重新分配后 B-TMD 对塔筒顶端面外和面内位移的控制变差。面外位移的收敛时间延长,峰值位移不变;面内位移波动幅度增大,位移峰值增大,控制效果下降较大。由图 9 可知塔筒顶端面外位移峰值频率增大,峰值频率能量密度增加,对比图 6(a) NOTMD 工况发现仍有一定的调谐作用,此时的调谐比依然为 1.0。阻尼器参数重新分配后塔筒顶端面内位移峰值频率能量密度与无控制时相同,调谐比为 0.4。由此可见,B-TMD 对塔筒顶端面外和面内位移控制的鲁棒性较差。为了进一步明确阻尼器参数的分配对结构控制效果带来的影响,考虑阻尼器面外与面内参数比为 0.6、1.0、1.5、2.3、4.0、9.0,图 10 为 B-TMD5D 工况下塔筒顶端面外和面内位移标准差随阻尼器参数比变化曲线。

由图 10 可知,随着阻尼器参数比的增大,B-TMD 对塔筒顶端面外和面内位移控制效果均下降,对面内位移控制效果下降更为明显,当面外和面内的阻尼器参数相同时(参数比为 1),B-TMD 控制效果最优。

5 结 论

- a. B-TMD 对塔筒起到双向控制作用,同时降低了风机塔筒在面外和面内的振动响应,对于塔筒顶端的控制效果更佳。
- b. B-TMD 对塔筒顶端面外和面内位移控制效果随着质量比增大而提高,受风冰角影响不大。相同质量比时,不同风冰角下(风冰角 0°以上)塔筒顶端面外和面内位移标准差降低百分比差值均不超过 2 个百分点。
- c. B-TMD 鲁棒性较差,对于面外和面内的阻尼器参数分配较为敏感,当面外和面内的阻尼器参数相同时,B-TMD 能够发挥最优的控制效果。

参考文献:

[1] 郭玉娣,王铁,程善俊,等. 渤海海冰时空分布特征和大气环流对渤海海冰的强迫作用[J]. 自然资源遥感,2024,36(1): 242-249. (GUO Yudi, WANG Tie, CHENG Shanjun, et al. Sea ice in Bohai Sea: spatio-temporal distribution and the forcing effects of atmospheric circulation[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(1): 242-249. (in Chinese))

[2] 董霄峰,练继建,王海军. 海上风机结构振动监测试验与特性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(2): 191-199. (DONG Xiaofeng, LIAN Jijian, WANG Haijun. Monitoring experiment and characteristic analysis of structural vibration of offshore wind turbine[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(2): 191-199. (in Chinese))

[3] 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[J]. 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[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(2): 32-39. (in Chinese))

[4] 朱本瑞,孙超,黄焱. 冰区海上单桩风机振动响应与控制[J]. 振动与冲击, 2021, 40(9): 133-141. (ZHU Benrui, SUN Chao, HUANG Yan. Vibration response and control of offshore monopile wind turbine in ice area[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(9): 133-141. (in Chinese))

[5] STEWART G M, LACKNER M A. The effect of actuator dynamics on active structural control of offshore wind turbines[J]. Engineering Structures, 2011, 33(5): 1807-1816.

[6] STEWART G, LACKNER M. Offshore wind turbine load reduction employing optimal passive tuned mass damping systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1090-1104.

[7] 杨州. 采用双向调谐质量阻尼器的风电结构减振控制研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.

[8] 李万润,杨州,杜永峰. 一种新型风电塔架结构用双向 TMD 风致响应减振控制研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(12): 114-123. (LI Wanrun, YANG Zhou, DU Yongfeng. Wind induced vibration mitigation of wind turbine structures with a new bi-directional TMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(12): 114-123. (in Chinese))

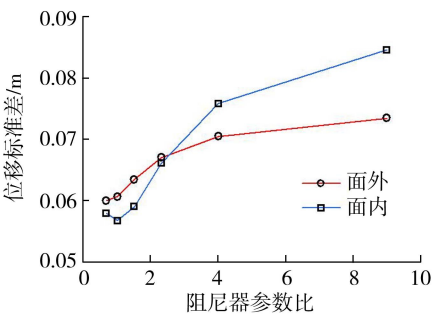


图 10 B-TMD5D 工况下塔筒顶端位移标准差随阻尼器参数比变化曲线

Fig. 10 Variation curve of displacement standard deviation of tower top with damper parameter ratio under B-TMD5D

[9] 贺瑞,王海宇,郑金海. MICP 加固对海上风机单桩基础静力特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3): 65-73. (HE Rui,WANG Haiyu,ZHENG Jinhai. Influence of MICP reinforcement on static properties of monopiles of offshore wind turbine[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):65-73. (in Chinese))

[10] 张子明,杜成斌,江泉. 结构动力学[M]. 南京:河海大学出版社,2009.

[11] 周良茂,卢文达,邓祖成. 近地面风的实测与研究[R]. 西安:水利电力部西安热工研究所,1982.

[12] 张希黔,葛勇,严春风,等. 脉动风场模拟技术的研究与进展[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(6):206-212. (ZHANG Xiqian,GE Yong,YAN Chunfeng,et al. Advances in research of simulation technology of fluctuation wind loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2008,28(6):206-212. (in Chinese))

[13] 张延涛,吕柏呈,武文华,等. 基于现场实测的渤海风速特性研究[J]. 海洋工程,2020,38(1):147-153. (ZHANG Yantao,LYU Baicheng,WU Wenhua,et al. Wind characteristics analysis of Bohai Bay based on field measurement[J]. The Ocean Engineering,2020,38(1):147-153. (in Chinese))

[14] 鲍侃袁,沈国辉,孙炳楠. 双曲冷却塔的脉动风荷载模拟和风致响应[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(5):955-961. (BAO Kanyuan,CHEN Guohui,SUN Bingnan. Numerical simulation of fluctuating wind load and wind induced response of large hyperbolic cooling tower[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2010,44(5):955-961. (in Chinese))

[15] 朱本瑞,孙超,黄焱. 海上单桩风机结构冰激振动响应分析[J]. 土木工程学报,2021,54(1):88-96. (ZHU Benrui,SUN Chao,HUANG Yan. Ice-induced vibration response analysis of monopile offshore wind turbine[J]. China Civil Engineering Journal,2021,54(1):88-96. (in Chinese))

[16] KÄRNÄ T,QU Y,KÜHNLEIN W L. A new spectral method for modeling dynamic ice actions[C]//23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vancouver:ASME,2004:13-36.

[17] 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 Laboratory,2009.

[18] 鲍金虎,苏静波,吴锋,等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及 p - y 曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):127-134. (BAO Jinhu,SU Jingbo,WU Feng,et al. Field horizontal loading test and p - y curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay groundsill [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):127-134. (in Chinese))

[19] 杨丽婷. 渤海海底浅层土土层分布的数值模拟[D]. 天津:南开大学,2003.

[20] Guideline for the certification of offshore wind turbines[R]. Hamburg:Germanischer Lloyd,2005.

[21] DEN HARTOG J P. Mechanical vibrations[M]. New York:Courier Dover Publications,2013.

[22] 鲁正,廖元,吕西林. 调谐质量阻尼器和调谐型颗粒阻尼器减震性能对比研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(12):163-168. (LU Zheng,LIAO Yuan,LYU Xilin. Comparison study of damping performance between tuned mass damper and tuned particle damper[J]. Journal of Building Structures,2019,40(12):163-168. (in Chinese))

[23] 乐治济,田会元,谢文博,等. 风、冰荷载联合作用下的海上单桩风机结构 TMD 减振控制模拟[J]. 可再生能源,2024,42(2):189-197. (LE Zhiji,TIAN Huiyuan,XIE Wenbo,et al. Simulation of TMD vibration control for offshore monopile wind turbine structures under combined wind and ice loads[J]. Renewable Energy Resources,2024,42(2):189-197. (in Chinses))

(收稿日期:2024-07-25 编辑:熊水斌)