

海上风机多桩式支撑结构动力学特性

黄中华^{1,2},刘喆¹,谢雅¹

(1. 湖南工程学院 机械工程学院,湖南 湘潭 411104;

2. 新能源汽车轻量化湖南省工程研究中心,湖南 湘潭 411104)

摘要:为获取多桩式支撑结构动力学特性,以某型 3 MW 海上风机四桩式支撑结构为研究对象,建立考虑桩土相互作用的支撑结构有限元模型,开展多桩式支撑结构动力学分析。计算支撑结构前 6 阶固有频率和振型并进行共振复核,结果表明:支撑结构在工作中不会发生共振。分析关键设计参数对支撑结构 1 阶固有频率的影响规律,结果表明:1 阶固有频率随塔顶质量、塔筒高度的增大而减少,随基础结构各构件直径和壁厚的增大而增加;设计参数在 $\pm 5\%$ 变化范围内,塔筒高度变化对 1 阶固有频率影响最大,水平横撑直径和壁厚变化对 1 阶固有频率几乎无影响。

关键词:海上风机;多桩式支撑结构;动力学分析;共振

中图分类号:TH113 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0015-04

Dynamic Characteristics of Offshore Wind Turbine Multi-pile Support Structure

HUANG Zhonghua^{1,2}, LIU Zhe¹, XIE Ya¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China;

2. Hunan Engineering Research Center of New Energy Vehicle Lightweight, Xiangtan 411104, China)

Abstract: In order to obtain the dynamic characteristics of multi-pile supported structure, with a 3 MW offshore wind turbine the four-pile support structure as the research object, the finite element model of supporting structure considering pile-soil interaction is established, and the dynamic analysis of the multi-pile supporting structure is carried out. The first six natural frequency and vibration shape of the wind turbine support structure are calculated, and their resonance is checked. Analysis results show that the supporting structure will not resonate in operation. The analysis results of the influence law between the key design parameters and the first order model frequency of the supporting structure show that the first order modal frequency of the support structure decreases with the increase the top mass of the wind turbine tower and the tower height, and increase with the increase the diameter and thickness of the foundation structure. In the range of $\pm 5\%$, the change of tower height has the greatest impact on the first order modal frequency, and the change of horizontal brace diameter and thickness has little impact on the first order modal frequency.

Keywords: offshore wind turbine; multi-pile supporting structure; dynamic analysis; resonance

0 引言

海上风机的支撑结构由塔筒和基础组成,是关键承载部件,不仅承受机舱和风轮的质量,还受到风、浪等复杂载荷的持续作用,其可靠性对海上风机安全运行有重要影响^[1-3]。随着海上风电向深海进军,多桩(三桩及以上)式支撑结构由于具有刚度大、承载能力高等特点,在海上风机的使用越来越广泛^[4-5]。复杂载荷作用下的多桩式支撑结构可靠性设计不仅需要满足静强度要求,而且还要考虑动力学特性,避免支撑结构在工作中固有频率接近激励载荷频率而产生共振,影响海上风机的稳定运行。

近年来,许多学者对海上风机单桩式支撑结构动力学特性进行了深入研究,取得了较好的研究成果。文献[6]按照一定比例制造单桩式支撑结构模型进行水平循环加载实验,分析单桩式支撑结构固有频率与桩侧土体剪切应变之间的关系。文献[7]考虑土体和水体对桩基础固有

频率的影响,使用激振法计算结构的 1 阶固有频率,并提出大直径单桩变径体系 1 阶固有频率量化方法。文献[8]建立了单桩基础桩土相互作用实体模型,分析了桩基周围土体局部冲刷前后,单桩基础固有频率的变化。文献[9]使用数值求解法计算了单桩基础固有频率,分析了固有频率偏移因素,并提出了减小频率偏移的措施。但是关于海上风机多桩式支撑结构的动力学特性研究较少,多桩式支撑结构设计参数更多,结构更复杂,因此对多桩式支撑结构开展系统的动力学特性研究具有重要意义。

本文以某型 3 MW 海上风机四桩式支撑结构为研究对象,考虑桩土相互作用,建立支撑结构有限元模型,开展多桩式支撑结构动力学分析,以期海上风机多桩式支撑结构的设计提供理论依据和技术支持。

1 模态分析理论

模态分析用于计算结构的固有频率和振型,判断结构

基金项目:国家自然科学基金项目(51875193);湖南省自然科学基金项目(2019JJ60039)

第一作者简介:黄中华(1979—),男,湖南娄底人,教授,博士,研究方向为机械系统动力学。

是否会由于激振频率发生共振。在使用有限元方法进行模态分析时,由于阻尼对支撑结构固有频率影响非常小,求解时忽略阻尼的影响^[10]。求解结构固有频率和振型的动力学方程如下:

$$\mathbf{K} + \omega_i^2 \mathbf{M} \{\varphi_i\} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; ω_i 为第*i*阶固有频率; φ_i 为第*i*阶振型。

2 支撑结构有限元模型

2.1 风机参数

本文研究涉及的某型 3 MW 海上风机主要参数如表 1 所示。

表 1 风机主要参数

参数	数值
额定功率/kW	3 000
风轮直径/m	91.6
轮毂高度/m	90
机舱、轮毂、叶片质量/kg	160 000
切入风速/(m/s)	3.5
额定风速/(m/s)	12.0
切出风速/(m/s)	25.0
极限参考风速/(m/s)	50.0

2.2 支撑结构参数

四桩式支撑结构包括锥形薄壁塔筒和基础结构,其主要参数如表 2 所示。

表 2 四桩式支撑结构主要参数

支撑结构	直径/m	壁厚/mm	长度/m
塔筒	顶部	3.6	45
	底部	4.3	50
	立柱	4.4	60
基础结构	上部斜撑	1.5	45
	下部斜撑	1.2	30
	水平横撑	0.8	30
	桩基	2.0	30

支撑结构中的钢构件材料均为 Q345E 钢,密度为 7 850 kg/m³,屈服强度为 345 MPa,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.26。四桩式支撑结构如图 1 所示,其中 1 为塔筒、2 为立柱、3 为上部斜撑、4 为桩基、5 为水平横撑、6 为下部斜撑。

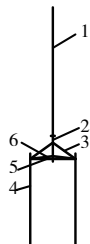


图 1 四桩式支撑结构

2.3 地质资料

海上风机所处工程区域地质的土层示意图如图 2 所示,桩基进入海底的土层自上而下依次为淤泥质黏土层、淤泥质粉质黏土层、淤泥层、粉砂层、粉质黏土层和细砂层,桩基底端以非常硬的细砂层作为持力层。

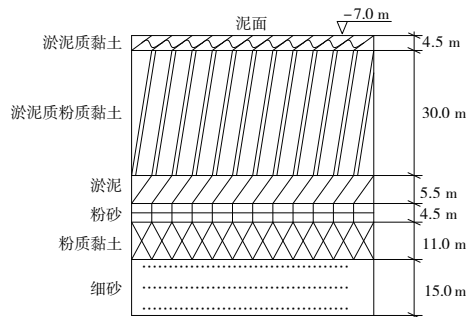


图 2 土层示意图

2.4 有限元建模

本文使用有限元方法开展海上风机四桩式支撑结构动力学分析。按照以往分析经验,需对支撑结构进行合理简化处理后建立有限元模型。具体处理如下^[11-13]。

- 1) 塔筒和基础结构之间的连接设置为刚性连接。
- 2) 塔筒相邻段之间的连接设置为刚性连接。
- 3) 不考虑支撑结构中螺栓连接预紧力的作用且不考虑焊缝缺陷和残余应力等因素。
- 4) 考虑机舱、轮毂、叶片的质量对支撑结构刚度的影响。塔顶(叶片、轮毂、机舱的合质心处)建立质量点,质量为叶片、轮毂和机舱的质量和。
- 5) 考虑水平方向桩土相互作用。使用线性弹簧模拟水平方向桩土相互作用(桩基入土段以 1 m 为单元高度进行分段,在每段施加水平方向线性弹簧)。

线性弹簧的刚度 K 计算公式如下:

$$K = m B_0 z h \quad (2)$$

式中: m 为地基土水平抗力系数的比例系数,取值参照《港口工程桩基规范》和《JGJ94—2008 建筑桩基技术规范》; B_0 为桩的计算宽度,当桩截面为圆形时 $B_0 = 0.9(d+1)$, d 为桩基直径; z 为桩基在泥面以下深度; h 为单元高度。

- 6) 桩基底部为全约束,线性弹簧远离桩基的节点为全约束。

质量点用 mass21 单元模拟,基础结构用 pipe288 单元模拟,塔筒用 beam188 单元模拟,桩土相互作用用 combine14 单元模拟,有限元模型如图 3 所示。

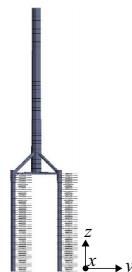


图 3 四桩式支撑结构有限元模型

3 支撑结构动力学特性

3.1 模态分析

使用有限元软件对支撑结构进行模态分析,求解支撑结构前6阶固有频率和振型。支撑结构前6阶固有频率和振型分别如表3和图4所示。支撑结构的前6阶振型主要表现为 xz 或 yz 平面的弯曲变形;1阶固有频率和2阶固有频率相近,3阶固有频率和4阶固有频率相近,5阶固有频率和6阶固有频率相近,这是由于结构在 xz 和 yz 平面对称所致。

表3 四桩式支撑结构前6阶固有频率 单位:Hz

阶数	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶
固有频率	0.357 0	0.357 03	2.223 4	2.223 8	3.451 5	3.453 8

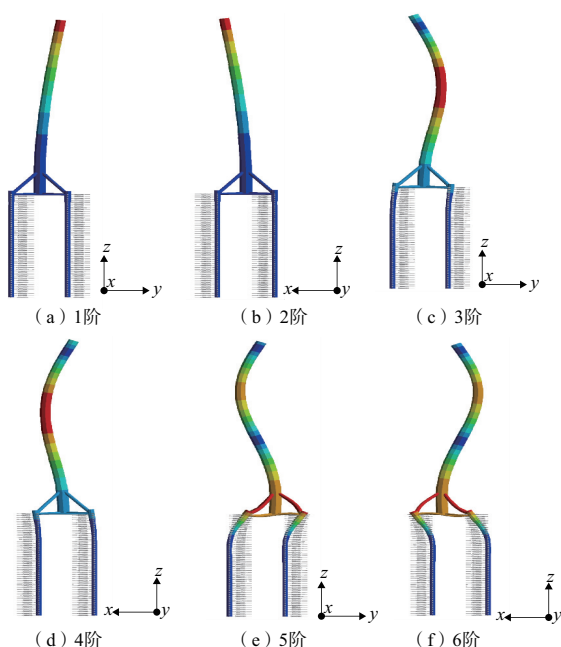


图4 四桩式支撑结构前6阶振型

根据海上风机设计规范,要求支撑结构的固有频率避开外界激振频率,且保持5%以上的差值,以避免支撑结构发生共振破坏^[14]。海上风机支撑结构主要激振源为风轮扫掠激振及波浪激振。本文研究的某型3 MW海上风机风轮转速范围为8.6~18.4 r/min,风轮的扫掠频率1P范围为0.143 3~0.306 7 Hz,3P范围为0.429 9~0.920 1 Hz,工程区波浪频率范围为0.103 0~0.239 7 Hz。四桩式支撑结构激振频率范围如图5所示,安全区域①区范围为0~0.097 9 Hz,②区范围为0.322 0~0.408 4 Hz,③区范围为0.966 1 Hz~ $+\infty$ 。1阶固有频率和2阶固有频率位于②区,3阶及以上固有频率位于③区,支撑结构不会因外界激振频率发生共振破坏。

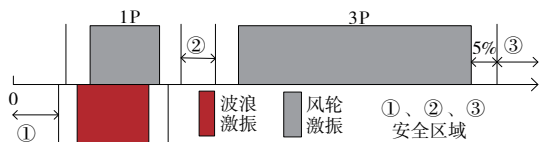


图5 四桩式支撑结构激振频率范围

3.2 参数作用规律分析

由3.1节可知,支撑结构1阶固有频率和2阶固有频率位于安全区域②区,但安全区域②区范围较小,1阶固有频率和2阶固有频率容易与外界激振频率重合导致支撑结构发生共振破坏,因此有必要采用单一变量法逐一分析关键设计参数与支撑结构1阶固有频率和2阶固有频率的作用规律。由于1阶固有频率和2阶固有频率相差不足0.01%,本文仅分析关键设计参数与支撑结构1阶固有频率作用规律。

将塔顶质量设为变量,塔顶质量 m' 变化范围为 $1.35 \times 10^5 \sim 1.85 \times 10^5$ kg,不同塔顶质量 m' 对应的支撑结构1阶固有频率如图6所示,支撑结构1阶固有频率随着塔顶质量 m' 增大而减少。塔顶质量 m' 的增大使支撑结构的等效质量增加同时降低了支撑结构的等效刚度,因此支撑结构1阶固有频率减小。当塔顶质量 $m' = 1.85 \times 10^5$ kg时,支撑结构1阶固有频率为0.338 6 Hz,接近安全区域②区下限值0.322 0 Hz。

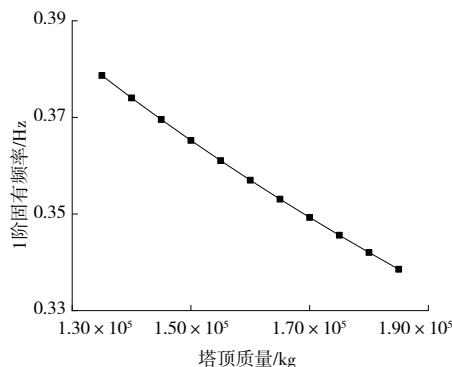


图6 塔顶质量与1阶固有频率作用规律

将塔筒高度设为变量,塔筒高度 h_1 变化范围为75.5~78.5 m,不同塔筒高度 h_1 对应的支撑结构1阶固有频率如图7所示。支撑结构1阶固有频率随着塔筒高度 h_1 增大而显著减小,塔筒高度的增大使支撑结构的等效刚度显著下降,因此支撑结构1阶固有频率显著减小。当塔筒高度 $h_1 = 78.5$ m时,支撑结构1阶固有频率为0.339 5 Hz,接近安全区域②区下限值0.322 0 Hz。

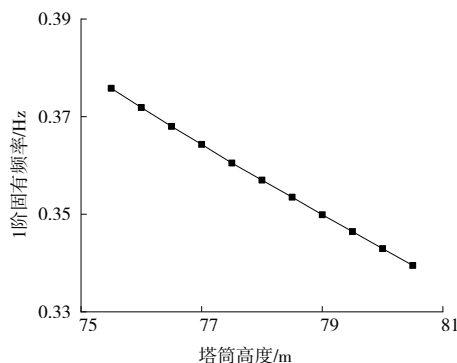


图7 塔筒高度与1阶固有频率作用规律

将基础结构各构件直径 D_i ($i=1,2,\dots,5$)逐一设置为

变量,立柱直径 D_1 变化范围为 3.9~4.9 m,上部斜撑直径 D_2 变化范围为 1~2 m,下部斜撑直径 D_3 变化范围为 0.7~1.7 m,水平横撑直径 D_4 变化范围为 0.3~1.3 m,桩基直径 D_5 变化范围为 1.5~2.5 m,各构件不同直径对应的支撑结构 1 阶固有频率如图 8 所示。支撑结构 1 阶固有频率随着基础结构各构件直径增大而增加,其中支撑结构 1 阶固有频率随下部斜撑、桩基直径的增大,增加趋势逐渐变缓。基础结构各构件直径的增大增加了支撑结构的等效刚度,因此使得支撑结构 1 阶固有频率增加。

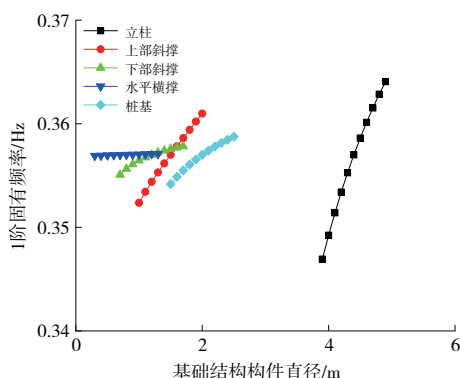


图 8 基础结构各构件直径与 1 阶固有频率作用规律

将基础结构各构件壁厚 $T_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 逐一设置为变量,立柱壁厚 T_1 变化范围为 35~85 mm,上部斜撑壁厚 T_2 变化范围为 20~70 mm,下部斜撑壁厚 T_3 变化范围为 5~55 mm,水平横撑壁厚 T_4 变化范围为 5~55 mm,桩基壁厚 T_5 变化范围为 7~57 mm,各构件不同壁厚对应的支撑结构 1 阶固有频率如图 9 所示,支撑结构 1 阶固有频率随着基础结构各构件壁厚增大而增加,其中随立柱、上部斜撑、下部斜撑及桩基壁厚的增大,增加趋势逐渐变缓,特别是下部斜撑、桩基壁厚变缓趋势最明显。基础结构各构件壁厚的增大也增加了支撑结构的等效刚度,因此使得支撑结构 1 阶固有频率增加。

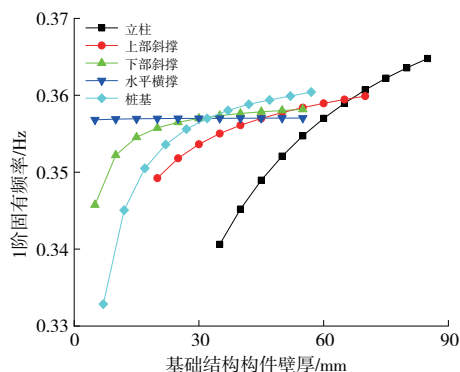


图 9 基础结构各构件壁厚与 1 阶固有频率作用规律

4 参数敏感度分析

为定量地比较不同关键设计参数在一定变化范围内对支撑结构 1 阶固有频率影响的大小,本文引入敏感度 S

作为衡量指标。敏感度 S 定义^[15]为

$$S = \frac{|\Delta f|/f}{|\Delta x|/x} \quad (3)$$

式中: f 为支撑结构 1 阶固有频率参考值; Δf 为某一参数变化时对应的 1 阶固有频率变化值; x 为设计参数参考值; Δx 为设计参数变化值。

由式(3)可知 S 值越大,关键设计参数变化对支撑结构 1 阶固有频率的影响越大。以本文中某型 3 MW 海上风机的关键设计参数值作为参考,将所研究的关键设计参数分别调整 $\pm 5\%$, 计算支撑结构 1 阶固有频率对不同关键设计参数的敏感度如图 10 所示,关键设计参数在 $\pm 5\%$ 变化范围内对支撑结构 1 阶固有频率影响程度由大到小排序为: $h_1, m', D_1, T_1, D_2, D_3, T_5, T_2, D_3, T_3, D_4, T_4$; 塔筒高度对 1 阶固有频率影响最大,水平横撑直径和壁厚对 1 阶固有频率几乎无影响。

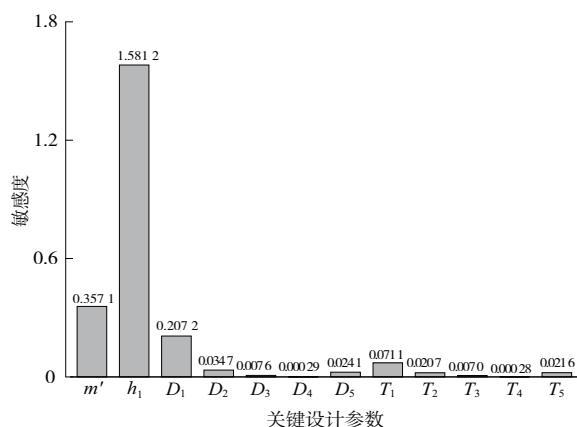


图 10 敏感度计算柱状图

5 结语

1) 考虑桩土相互作用,建立了某型 3 MW 海上风机四桩式支撑结构有限元模型,对支撑结构开展了模态分析,计算了前 6 阶固有频率和振型并进行了共振复核,结果表明:支撑结构前 6 阶固有频率能避开激振频率,不会发生共振破坏。

2) 分析了关键设计参数与支撑结构 1 阶固有频率作用规律,结果表明:支撑结构 1 阶固有频率随塔顶质量、塔筒高度增大而减少,随基础结构各构件直径和壁厚的增大而增加;下部斜撑、桩基壁厚与支撑结构 1 阶固有频率作用时均存在较明显临界值,超过临界值后 1 阶固有频率增加趋势明显变缓。

3) 比较了关键设计参数在 $\pm 5\%$ 变化范围内对支撑结构 1 阶固有频率影响程度,影响程度由大到小排序为: $h_1, m', D_1, T_1, D_2, D_3, T_5, T_2, D_3, T_3, D_4, T_4$ 。在满足静强度要求下,可根据不同设计参数在一定变化范围内对 1 阶固有频率影响程度的大小,选择适当的设计参数改变其数值,有效调整支撑结构 1 阶固有频率,从而避开激振频率,防止支撑结构发生共振破坏。

(下转第 34 页)

图 11 是施力点在位置 3 时的加载状态,射线组为加载力及其位置,计算结果主机架上最大应力为 37.7 MPa。

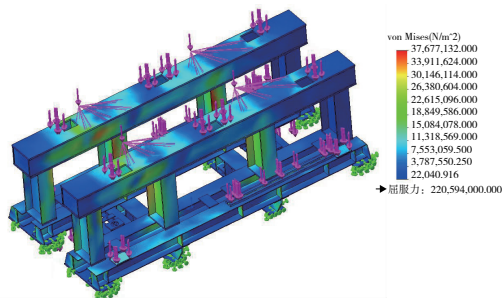


图 11 称重试验主体支撑结构应力 3

综合以上数据,主体支撑结构所受应力最大是在施力点处于位置 1 时,最大应力为 38.3 MPa,未超出 Q235 钢许用应力 142 MPa 的标准,因此主体支撑结构的设计强度满足标准要求。

3 结语

动车综合落成系统设备主体支撑结构将动车组车体落成、称重调整、尺寸测量调整等多作业装置集成在同一工位上,在满足承载力要求的前提下,结构尺寸综合考虑了多装置安装及作业时所需要的空间,使 3 种作业装置无冲突。

通过对动车综合落成系统主机架进行承载分析,主机架在静载荷作用下,最大相对位移为 0.22 mm,满足主体支撑结构上平面最大变形位移量不超过 0.5 mm 的标准要求;主机架在称重工况下,产生的最大应力为 38.3 MPa,满足 Q235 钢许用应力 142 MPa 的标准,主机架的设计刚度和强度均满足标准要求。

通过上述结论可以看出主体支撑结构不论是刚度还是强度都远满足设计标准,从节约成本的角度,对结构进行进一步优化设计,在应力云图显示的低应力区增开减重孔,并重复上述力学计算,结果表明结构依旧满足设计要求。

参考文献:

- [1] 胡平. 动车组综合落成设备研究与应用[J/OL]. 铁道机车车辆, (2021-03-30). [2022-01-01]. <https://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbprefix=SCDB&crossDbcodes=CJFQ, CDFD, CMFD, CPFD, IPFD, CCND, CCJD>.
- [2] 曹峰. 城轨车落车调整工艺性分析及其重要性[J]. 科技创新导报, 2017, 14(25): 26, 28.
- [3] 罗旭. 地铁车辆段移动架车机同步控制应用分析[J]. 工程建设与设计, 2018(5): 115-117.
- [4] 赵小磊, 苏忠侃, 王旭. 称重式固定架车机安装工艺及控制相点[J]. 科技经济刊, 2020, 28(8): 62, 69.
- [5] 钱宇. 精益生产在动车组检修中的应用分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019.
- [6] 国家铁路局. TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [7] 国家铁路局. TB 10028—2016 铁路动车组设备设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [8] 中国铁路总公司. 铁路动车组运用维修规程: 铁总运[2017] 238 号[Z]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [9] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2782—1997 铁道机车车辆称重台技术条件[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [10] 中华人民共和国铁道部运输局. JW1Z 动车组轮重检测装置技术评审意见: 铁装管验[2010] 816 号[Z]. 北京: 中华人民共和国铁道部运输局, 2010.

收稿日期: 2021-11-17

(上接第 18 页)

参考文献:

- [1] 周映鸣, 李晓勇, 陈晓庆. 海上风机支撑结构整体优化设计[J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 86-92.
- [2] BHATTACHARYA S, ADHIKARI S. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(5/6): 805-816.
- [3] SHIRZADEH R, DEVRIENDT C, BIDAVIDI M A, et al. Experimental and computational damping estimation of an offshore wind turbine on a monopile foundation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 120: 96-106.
- [4] 邓友生, 李卫超, 王倩, 等. 风电机组基础结构形式及计算方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8429-8439.
- [5] 孟繁星. 风浪联合作用下的海上风机支撑结构时域疲劳分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [6] LOMBARDI D, BHATTACHARYA S, MUIR WOOD D. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49: 165-180.
- [7] 姜焱培, 王伟, 罗仑博, 等. 考虑桩周土体的海上风电大直径

单桩变径体系 1 阶频率研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1433-1440.

- [8] 陈静, 田德, 闫肖蒙, 等. 局部冲刷作用下海上风电机组支撑结构响应[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1401-1407.
- [9] 杨春宝, 王睿, 张建民. 单桩基础型近海风机系统自振频率实用计算方法[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 219-225.
- [10] 郭健, 杨敏, 王伟. 海上风机高桩承台基础模态建模分析研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 1172-1175.
- [11] 姚激, 张炳权, 曹亮, 等. 不同分析方法对风力机塔筒动力特性的研究[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(4): 401-406.
- [12] 邹彩云, 姜贞强, 罗金平. 桩土相互作用模拟方法对海上风机整体结构模态分析的影响[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 236-238, 166.
- [13] 卢东海. 基于 ANSYS 的导管架式海上风力发电机组支撑结构分析[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [14] Germanischer Lloyd. Guideline for the certification of offshore wind turbines[Z]. [S.I.]: Uetersen: Germanischer Lloyd Wind Energie GmbH, 2005.
- [15] 刘彬. 建设工程经济[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2014.

收稿日期: 2021-10-20