

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.025

单桩式海洋风电装置风振数值分析和现场监测研究

李凯文¹, 黄帅²

(1. 广东电网能源发展有限公司, 广东 广州 510160;

2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

摘要:为了研究大型单桩式海洋风电装置风振效应较为显著的原因,利用 p-y 曲线法考虑结构的桩土相互作用,理论分析了风-结构流固耦合的原理与特性,并通过 ADINA 软件建立了“风轮-机舱-塔架-基础”整机的数值模型,对风电装置整机结构的风致振动问题进行了数值模拟,并与现场监测数据进行对比。结果表明,数值模态分析与现场监测结果较为吻合,考虑流固耦合效应的风致风电整机结构的动力响应数值分析与现场振动监测结果较为接近,且趋势一致。研究成果证明了文中提出的整机数值模型和数值风洞对风电整机结构进行风振分析的可行性与可靠性,可为风电装置结构设计及振动控制仿真研究提供科学依据,为类似工程结构的风振分析提供借鉴。

关键词:单桩式风电;加速度在线监测;数值模拟;p-y 曲线法;流固耦合;不同边界条件

中图分类号:TM614;TM315

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)03-0166-06

0 引言

随着风电装置大型化的发展,其结构的柔性也逐渐显著,由于空气动力、惯性力和弹性力等交变荷载的作用产生振动或变形,尤其是基础冲刷将会对结构动力特性产生显著影响,影响系统运行的可靠性,甚至会导致风电整机整体倒塌,造成巨大的经济损失。国内外学者已经展开相关研究,但现场测试环境与条件相对恶劣,海上风大浪急,现场监测具有局限性^[1-2]。现有研究主要集中在针对风电整机结构数值进行仿真模拟,文献[3]分析了风浪对海上风电动力特性的影响;文献[4]对 p-y 曲线法在海上单桩基础风电机的适用性进行了修正;文献[5]利用 Fluent 软件对风电机叶轮的气动性能进行了数值仿真研究;文献[6]根据现场监测数据对 p-y 曲线法在海上单桩基础在动力作用下的适用性进行了研究;文献[7]利用 ANSYS 建立了风电机塔架模型,对其固有频率和振型进行了研究;文献[8]对风电机叶片的流固耦合效应进行了分析;文献[9]对风电机叶片进行考虑流固耦合的数值模拟,分析了叶片与流场的相互作用对叶片和结构特性的影响;文献[10]研究了风场模型中强耦合算法与弱耦合算法的区别;文献[11]对大型海上单桩基础风电机桩土相互作用数值模拟进行了研究;文献[12-13]研究建模参数变化对风电机结构动力特性的影响。

收稿日期:2020-12-11;修回日期:2021-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708516);国家重点研发计划资助项目(2017YFC1500404)

综上所述,尽管对风电装置结构数值模拟及其数值方法研究方面取得了阶段性的成果,但以往研究主要是对单叶片或是基础的分析,未将风电机整机的风振反应纳入探讨。文中针对实际风电机的结构特点,建立了“风轮-机舱-塔架-基础”耦合的整机模型,并与现场监测数据进行对比分析,验证了精细化模拟的准确性。

1 风电机塔架振动现场监测

1.1 工程概况

现场监测的风电机组位于某海洋风电场,选取其中的单个风电装置为监测对象,该风电装置装机容量 3.0 MW,轮毂高度 86 m,塔架高度 75 m,塔筒底部直径 4.5 m,壁厚 50 mm,塔筒顶部直径 3.07 m,壁厚 20 mm,塔筒材料采用 Q345;叶轮为三叶片形式,直径 110 m;机舱罩为矩形结构,尺寸为 12.9 m×5.0 m×5.9 m;风电机切入风速 3.0 m/s,切出风速 25 m/s。采用单桩式钢管基础,桩径 5.0 m,桩长 43 m,壁厚 60 mm,桩基材料采用 Q345。工程场地的类型属于中软场地土,沿桩身方向向下,土层类型分别为粉砂层 1、粉土层、粉砂层 2、层状粉土层、粉质黏土层以及粉细砂层。各土层物理力学性能指标见表 1。

1.2 传感器布置方案

加速度监测点沿风电机塔架高度方向布设,各组测点对应布置在平台一至平台五处,在观测点处放置一个单向加速度传感器,利用动态信号处理系统记录强风荷载作用下加速度的变化情况^[14]。测试项目为风电机塔架的水平向振动加速度。测点

布置和监测设备连接如图 1 所示。

表 1 土层物理力学性能指标
Table 1 Physical and mechanical performance index of soil

土层名称	厚度/m	内摩擦角/(°)	凝聚力/kPa
粉砂 1	7.5	32.0	3.8
粉土	1.0	30.7	9.5
粉砂 2	5.0	32.0	5.0
层状粉土	12.5	30.6	8.3
粉质黏土	3.0	17.4	26.2
粉细砂	10.5	32.6	3.7

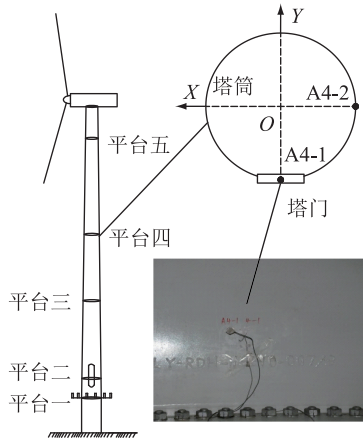


图 1 现场监测点的布置

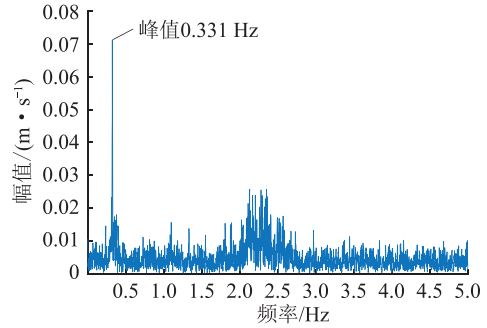
Fig.1 The arrangement of sensors at the monitoring

1.3 自振频率的测试

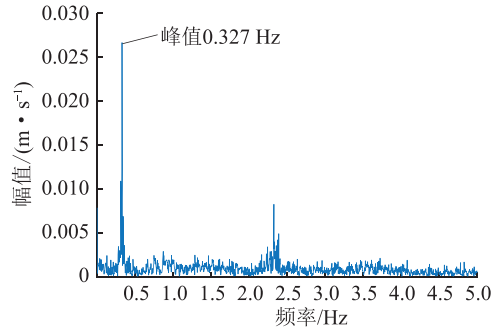
固有频率是反映结构动力特性的重要参数,现场监测中采用急刹车试验来测定风电机系统的固有频率。对风电机进行急刹车试验,即当风电机叶轮转速减至 3.0 r/min 时,进行急停试验,测试可以得到各个测点加速度时程曲线^[15],试验数据如图 2 所示。

由图 2 可以看出,2 次急刹车试验的监测结果基本相近,对 2 次试验所测频率取平均值,得到该风电机整机结构的基本自振频率为 0.329 Hz,阻尼比为 0.009 5。文中所研究的风电机叶轮的转速范围为 6.5~13.2 r/min,则风轮旋转频率为 0.108~0.22 Hz,风轮叶片通过频率为 0.325~0.66 Hz,塔架的自振频率在叶轮频率和叶片的通过频率之间,属于柔性塔。流固耦合效应对柔性塔结构的影响较大,风电机运行时风轮振动易与结构共振引起异常振动。风电机运行时风轮振动的激励频率允许范围可以参照《海上风力发电机组认证规范》,根据式(1)进行计算。

$$0.95 < \frac{f_R}{f_{0,n}} < 1.05 \quad (1)$$



(a) 第一次急刹车试验



(b) 第二次急刹车试验

图 2 急刹车测试时塔架顶部测点的自功率谱

Fig. 2 Torsional power spectrum curve on top of the tower at braking test

式中: f_R 为激励频率,指正常运行范围内风轮的旋转频率或风轮叶片通过频率; $f_{0,n}$ 为支撑结构的第 n 阶固有频率。

由式(1)可知,若风轮转速在 6.5~6.9 r/min 持续运行,风轮激励会引起与风电机整个系统的共振。因此,在风电机运行过程中,应对其运行状态进行实时监测,并控制风轮旋转频率靠近激励频率,防止风电机系统因共振而产生破坏。

2 流固耦合计算方法

2.1 流体力学运动方程

风电机塔架结构流固耦合的区域可以描述为风压引起塔架结构的变形,而后者反过来影响风压分布。流体可以分为不可压缩流体和可压缩流体,而空气是最常见的不可压缩流体之一。三维不可压缩粘性流体的 Navier-Stokes 方程^[13,16-17]为:

$$\operatorname{div} u = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \mu \Delta u_i + \frac{\partial p}{\partial x_i} = F_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中: u 为流体速度, $u = (u_1, u_2, u_3)$, 其中 u_1, u_2, u_3 分别为 x, y, z 方向上的速度分量; x_1 为体积上 x 方向, x_2 为体积上 y 方向, x_3 为体积上 z 方向; μ 为流体动力粘度; p 为流体压强; F_i 为作用在流体区域上的体积力。

2.2 弹性结构体有限元方程

将结构划分为无限个单元,其中单个单元的运动方程可表述为:

$$M_e \ddot{u}_e + C_e \dot{u}_e + K_e u_e = F_e \quad (4)$$

结构整体的运行方程式可以根据单元的运动方程作为基础按一定方式叠加而得到:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = F \quad (5)$$

式中: M 为结构的质量矩阵; C 为结构的阻尼矩阵; K 为结构的刚度矩阵; \ddot{u} 为结构节点的加速度; \dot{u} 为结构节点的速度; u 为结构节点的位移; F 为脉动风荷载向量。

2.3 流固耦合动力方程

在流固耦合计算中,分别定义风场模型和结构模型。结构模型基于 Lagrangian 坐标系,位移是基本未知量,而流体模型采用 Arbitrary-Lagrangian-Eulerian 坐标系,流体在力的作用下引起界面变形,并传递至结构引起结构的变形,通过流固耦合求解,可以计算出流场和结构场的应力应变、位移、加速度等,应用在流固耦合界面的基本条件是位移协调和力平衡,具体如下:

$$\begin{cases} u_f = u_s \\ n\tau_f = n\tau_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_f 为流体模型的位移; u_s 为结构模型的位移; τ_f 为流体模型的应力; τ_s 为结构模型的应力。

根据力平衡条件,在流固耦合界面上,流体的分布力根据下式积分为集中力施加到相应的结构节点上:

$$F(t) = \int u_d \tau_f dS \quad (7)$$

式中: u_d 为结构节点的位移; S 为流固耦合界面的面积。

流固耦合问题的物理实质就是联合求解方程组式(2)一式(4)和式(7)。

3 基于流固耦合的数值模拟方法

3.1 数值模型

将“风轮-机舱-塔架-桩基”作为整体来进行研究,并利用 ADINA 软件建立三维空间动力有限元模型。风轮为三叶片形式,采用 3-D solid 进行模拟;机舱由长方体在轮毂处切割一定倾角,采用 3-D solid 单元模拟;塔架采用壳体分段建立,单元划分采用 9 节点规则 shell 单元,网格密度采用定长值;桩基础采用 beam 单元模拟,桩土相互作用采用 p-y 曲线法^[18]予以考虑,并在结构模型所有受风荷载的边界面上设定流固耦合边界条件,采用小变形假设,具体如表 2 所示。风场数值模型如图 3 所示。

表 2 计算域的边界条件(缩尺比 1:1)

Table 2 Boundary conditions with scale of 1:1

位置	边界条件	条件描述
入流面	速度	来流风速为实测随机风速
出流面	无	空气压力为零
侧面	墙面	壁面上的流体速度矢量为零
结构面(液面以上)	流固耦合	边界上位移协调和力平衡
液面	自由面	液面速度与位移的在耦合界面处的法向量矢量和为零
侧面	固定 XY	XY 方向固定速度矢量为零
结构面(水中)	流固耦合	边界上位移协调和力平衡
泥面	固定 Z	Z 方向固定速度矢量为零

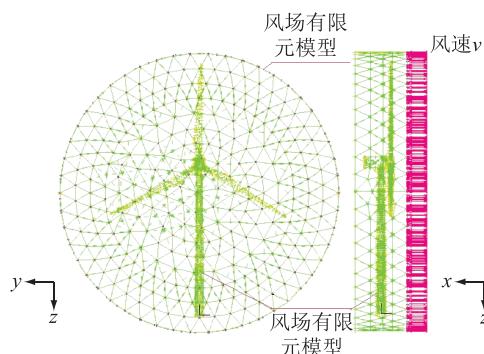


图 3 风电装置模型

Fig.3 Model of the wind power installation

3.2 监测时的风速

现场风速可以通过风电机舱顶部的测风系统进行实时记录,风速采集频率为 10 Hz。现场测试随机风速情况如图 4 所示。

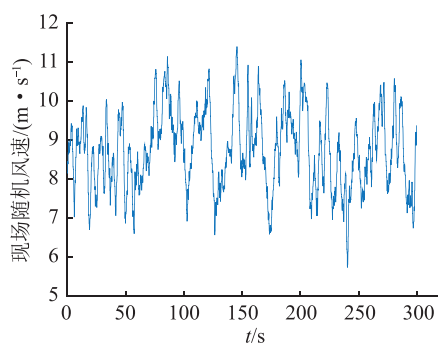


图 4 监测现场随机风速

Fig.4 Random velocity monitoring site

3.3 数值计算结果分析

文中采用有限元软件对风电机系统进行模态分析,风电机结构前 4 阶典型振型模态如图 5 所示。

由图 5 可知,风电机塔架的振动形式主要表现为侧向弯曲振动和实测得到的振动形式相同,考虑桩土相互作用时风电机塔架一阶频率 0.320 Hz,实

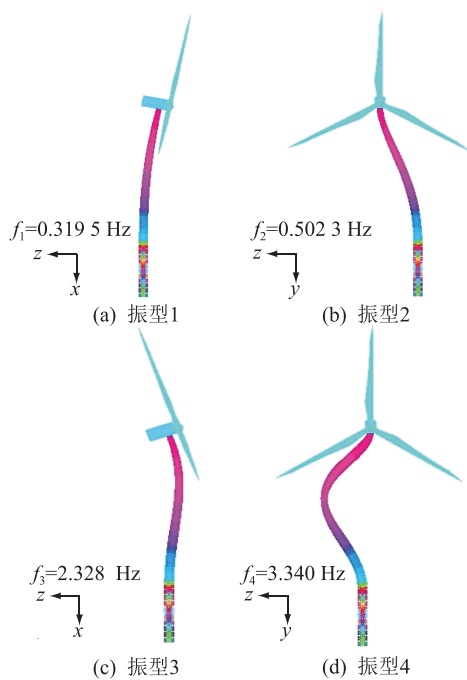


图5 风电机前4阶模态振型

Fig.5 The first four modal shapes and frequencies of typical wind turbine

测值为 0.329 Hz,通过比较可知,风电机塔架结构频率数值模拟值比实测值偏低,相差 2.89%,从工程意义上来讲满足工程要求。

文中基于流固耦合理论,对在风速作用下,风场与结构的流固耦合作用进行了模拟分析,图 6、图 7 为流场中典型的轴截面部分流速、湍流、流速以及气动压力云图。

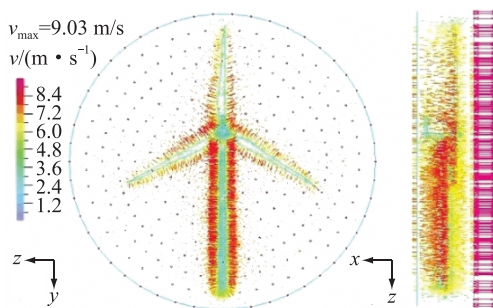


图6 风电机正面和侧面绝对速度矢量流场

Fig.6 The front and side absolute flow velocity vector of wind turbines

从图 6 可以看出,风场模型中,沿风电机流固耦合边界面上出现明显的速度集中区域,并在流固耦合边界面上流速方向改变,风速在不同程度上受到结构的阻碍作用。从图 7 可以看出,风电机流固耦合边界面上流场压力集中,区域外侧气体压强未受到扰动,风电机迎风面压力与背风面变化较大,说明文中提出的流固耦合的数值模拟方法能较好地反映风电机的流固耦合性质。此外,从图中可以明

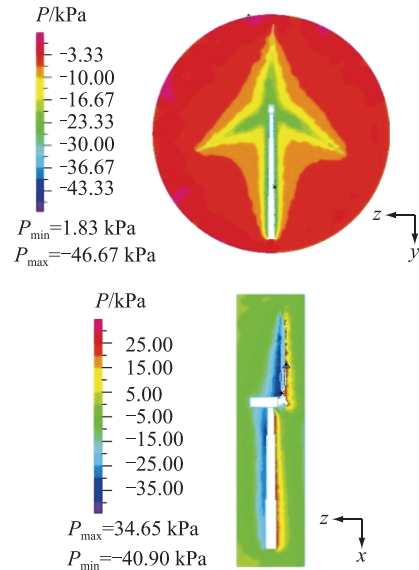


图7 风电机正面和侧面流场压力分布

Fig.7 Front and side pressure distribution of the flow field of wind

显地观测到风电机整机的气动特性和风速的流动现场,及其风速、流速等重要气动参数的分布特点,并能很好地显示出风电机周围的流场分布。

4 与现场监测结果对比分析

为了验证数值模型的合理性,在风电机塔架沿塔筒高度方向设置了多个测点,并计算了各个测点的振动情况,对比分析表明,不同测点的计算结果存在差异,但各测点结果的变化趋势相似。图 8、图 9 比较了塔架不同高度位置测点塔门方向与塔门法向加速度值的现场监测结果和数值模拟结果。图中现场监测数据为塔门方向与塔门法向的加速度监测值,A5-2 测点布设于塔架高度 73.5 m 处,A4-2 测点布设于塔架高度 44.8 m 处,数值模拟中观测点对应于现场测试中的测点。

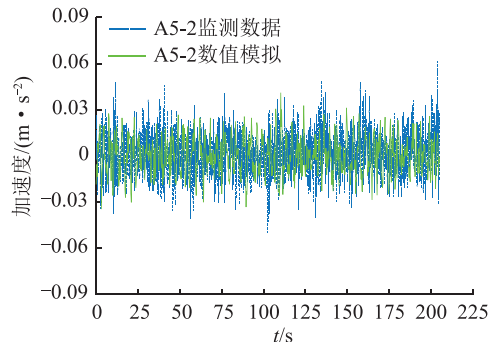


图8 塔架 73.5 m 处加速度模拟值与监测值

Fig.8 Simulation and site monitoring values of acceleration at tower 73.5 m

由图 8 可知,计算结果与实测结果在幅值和相位上存在一定的差异,分析认为这些差异是由于模

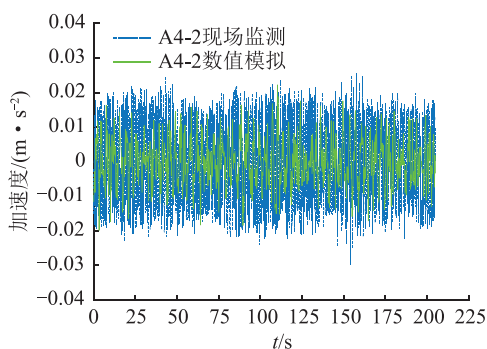


图9 塔架 44.8 m 处加速度模拟值与监测值

Fig.9 Simulation and site monitoring values of acceleration at tower 44.8 m

型中约束及荷载边界条件与实际情况间的差异所致,但总体来说计算得到的结果同实测结果的变化趋势接近,表明文中模型较为合理,可用于大型风电机组塔架结构风振反应分析中。

图 10 比较了风电机组塔架不同高度测点塔门方向和塔门法向加速度峰值的计算值与监测值。由于现场情况复杂,实测得到的各测点加速度峰值随风电机组塔架高度不同而波动,但总的趋势仍然是逐渐增加,且与数值模拟相比,在峰值和递增规律上基本一致。

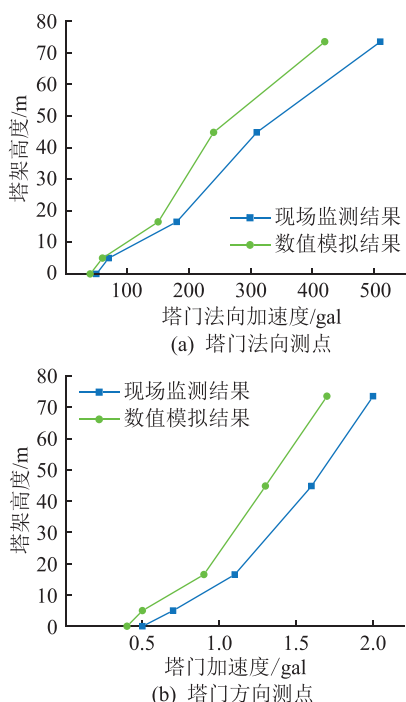


图 10 塔架不同高度处加速度峰值模拟值与监测值

Fig.10 Simulation and site monitoring values of peak acceleration at different tower heights

风电机组塔架顶部塔门法向测点数值模拟结果为 510 gal,与监测值相差 17.3%,塔门方向观测点数值模拟值为 1.7 gal,与监测值相差 15%。虽然数值

模拟值与监测值具有一定的差异,但是综合考虑数值模拟模型与实际模型存在一定的差异、实际风电机组周边流场环境极为复杂以及监测本身也存在误差等情况,从工程应用研究的方面来说,是可以接受的。此外,从图中还可以看出,随着塔架高度的增加,塔架的直径与壁厚的变化会对塔架的动力响应产生影响。因此,在风电机组塔架的加速度分析中,不能简单地乘以一个相同系数来处理不同高度加速度变化量。

5 结论

文中通过对风电机组塔架进行现场监测与数值模拟对比分析可以得到以下结论:

(1) 通过现场监测测得了风电机组整机系统基本振动频率,该频率与风轮振动的激励频率允许范围较为接近,容易引发风轮激励与塔架结构共振,因此在风电机组运行中,须予以重视。

(2) 采用 p-y 曲线法模拟桩土相互作用,采用“风轮-机舱-塔架-基础”整机建模方法,并对其进行模态分析,分析结果与现场监测结果较为吻合,验证了整机建模的合理性。

(3) 考虑风荷载与风电机组整机结构的流固耦合效应的动力响应分析,并与现场振动监测结果较为接近,从一定程度上说,采用数值风洞对风电机组结构进行风振分析是可靠、可行的,可为风电机组塔架风致振动的判别以及结构设计提供依据。

(4) 不同约束条件下风电机组系统的固有频率不同,因此在风电机组塔架结构施工中,可通过控制桩基础的约束程度来控制风电机组塔架的固有频率,以避免风电机组整机系统共振。

参考文献:

[1] 张安安,彭高强,李茜,等. 基于物质-能量流解析的海上微综合能源系统风险评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24):60-67.
ZHANG Anan, PENG Gaoqiang, LI Qian, et al. Risk assessment of offshore micro integrated energy system based on matter-energy flow analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24):60-67.

[2] 杜伟,罗先觉,王秀丽,等. 基于全系统可靠性评估方法的海上油田群电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12):108-116.
DU Wei, LUO Xianjue, WANG Xiuli, et al. Reliability evaluation on power system of offshore oilfield group based on system-wide reliability evaluation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12):108-116.

[3] MANENTI S, PETRINI F. Dynamic analysis of an offshore wind turbine: wind-waves nonlinear interaction [C]//12th Biennial

- International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments; and Fourth NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration. Honolulu, Hawaii, USA. Reston, VA, USA; American Society of Civil Engineers, 2010; 2014-2026.
- [4] HEARN E N, EDGERS L. Finite element analysis of an offshore wind turbine monopile [C]//GeoFlorida 2010. Orlando, Florida, USA. Reston, VA, USA; American Society of Civil Engineers, 2010; 1857-1865.
- [5] 张果宇, 蒋劲, 刘长陆. 风力发电机整机气动性能数值模拟计算与仿真研究[J]. 华东电力, 2009, 37(3): 449-452.
ZHANG Guoyu, JIANG Jin, LIU Changlu. Numerical simulation of aerodynamic performance for wind turbines[J]. East China Electric Power, 2009, 37(3): 449-452.
- [6] KIRSCH F, KLINGMÜLLER O. Driving of foundation piles for offshore wind turbines [C]//GeoCongress 2012. Oakland, California, USA. Reston, VA, USA; American Society of Civil Engineers, 2012; 471-482.
- [7] 李仁年, 童跃, 杨瑞. 风力发电机塔架固有频率和振型的有限元分析[J]. 甘肃科学学报, 2011, 23(3): 72-75.
LI Rennian, TONG Yue, YANG Rui. Finite element analysis of natural frequency and vibration mode of the wind turbine generator tower[J]. Journal of Gansu Sciences, 2011, 23(3): 72-75.
- [8] 常丽平, 李成, 铁瑛, 等. 复合材料风力发电机叶片的流固耦合分析[J]. 机械设计与制造, 2013(3): 227-230.
CHANG Liping, LI Cheng, TIE Ying, et al. Fluid-solid interaction analysis of composite wind turbine blades[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(3): 227-230.
- [9] 李媛, 康顺, 王建录, 等. 2.5 MW 风力机叶片流固耦合数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 71-74.
LI Yuan, KANG Shun, WANG Jianlu, et al. Numerical simulation of fluid-structure coupling of 2.5 MW wind turbine blades [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1): 71-74.
- [10] 李雨润, 袁晓铭, 李帆. 基于 API 规范的液化土层桩基 p-y 曲线修正计算公式[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(6): 148-153.
LI Yurun, YUAN Xiaoming, LI Fan. Modified formula for calculating p-y curves of pile foundation in liquefied soil layer based on API code[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(6): 148-153.
- [11] RACKWITZ F, SAVIDIS S E T. New design approach for large diameter offshore monopiles based on physical and numerical modelling [C]//GeoCongress 2012. Oakland, California, USA. Reston, VA, USA; American Society of Civil Engineers, 2012; 356-365.
- [12] BARBATO M, CIAMPOLI M, PETRINI F. Effects of modeling parameter uncertainty on the structural response of offshore wind turbines [C]//12th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments; and Fourth NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration. Honolulu, Hawaii, USA. Reston, VA, USA; American Society of Civil Engineers, 2010; 2027-2038.
- [13] 桂晓澜, 周岱, 李俊龙. 基于计算流体力学法的风场模拟和流/固耦合问题[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1): 158-166.
GUI Xiaolan, ZHOU Dai, LI Junlong. Wind field simulation and fluid-structure interaction problems based on CFD method [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(1): 158-166.
- [14] 周健, 金伟枫, 金卫华, 等. 风力发电机地基的现场加速度测试和数值模拟[J]. 西北地震学报, 2011, 33(S1): 257-260.
ZHOU Jian, JIN Weifeng, JIN Weihua, et al. Site acceleration test and digital simulation on the vibration of the wind turbine ground [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S1): 257-260.
- [15] 战家旺, 夏禾, 姚锦宝. 既有桥梁墩台自振频率测试的冲击振动试验法[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(1): 14-17.
ZHAN Jiawang, XIA He, YAO Jinbao. An impact vibration test method for measuring natural frequencies of existing piers [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2005, 29(1): 14-17.
- [16] 冯卫民, 宋立, 肖光宇. 基于 ADINA 的压力管道流固耦合分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(2): 264-267.
FENG Weimin, SONG Li, XIAO Guangyu. Coupling analysis of fluid-structure interaction in pressure pipes based on ADINA [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(2): 264-267.
- [17] 黄维平, 刘娟, 唐世振. 考虑流固耦合的大柔性圆柱体涡激振动非线性时域模型[J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 140-143.
HUANG Weiping, LIU Juan, TANG Shizhen. Nonlinear model of vortex induced vibration of flexible cylinder in consideration of fluid-structure interaction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(9): 140-143.
- [18] 杨国平, 张志明. 对大变位条件下横向受力桩 P-Y 曲线的研究[J]. 水运工程, 2002(7): 40-45, 71.
YANG Guoping, ZHANG Zhiming. Research on P-Y curve of laterally bearing piles under large displacement [J]. Port & Waterway Engineering, 2002(7): 40-45, 71.

作者简介:



李凯文

李凯文(1987),男,硕士,工程师,从事输变电工程建设及海洋风电装置动力响应研究工作(E-mail:likaiwen040917@126.com);

黄帅(1987),男,博士,副研究员,研究方向为城市基础设施的抗震及减灾、海洋工程结构的地震响应机理及抗震设防、海陆场地的地震液化机理和城市群防灾减灾体系构建。

The enlightenment of Japan and Singapore electricity retail market for the construction of electricity market in China

WANG Yue¹, LI Yuan², LIU Lijuan³, WU Haoliang¹, YANG Jie¹, LI Jin³

(1. Gansu Electric Power Trading Center Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China;

3. State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The construction of the domestic electricity retail market starts relatively later than that of many developed countries. The retail electricity prices and package plans are still immature and need to be further improved. Japan, Singapore and China have similar systems of electricity retail market, and have achieved certain achievements in the construction of the above aspects, which provides a reference for the construction of electricity retail market in China. The reform history of the electricity retail market in Japan and Singapore is sorted out, and the changes and current situations of the retail electricity prices and packages for the two countries are compared and analyzed after the retail market is fully liberalized. Furthermore, combined with the actual situation of well-established retail market in Yunnan, aspects of the market reforms, retail packages, retail electricity prices, retailers and online businesses in the construction of retail markets in Japan and Singapore are analyzed. Suggestions such as gradually liberalizing the retail market, launching joint packages, and constructing network platform are put forward in order to provide reference for the improvement and development of electricity retail market in China.

Keywords: electricity retail market; market reform; retail package; retail electricity price; retailer

(编辑 吴楠)

(上接第 171 页)

Site monitoring and numerical simulation on the vibration of the marine wind power installation founded on monopiles

LI Kaiwen¹, HUANG Shuai²

(1. Guangdong Power Grid Energy Development Co., Ltd., Guangzhou 510160, China;

2. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to find the reasons why the wind vibration effect of the large single-pile offshore wind power installation is more significant, the pile-soil interaction of the structure is considered using the p-y curve, the principle and characteristics of the wind-structure fluid-structure coupling are theoretically analyzed. The numerical model of the "wind wheel-cabin-tower-foundation" machine model is established by the ADINA software and used to simulate the wind-induced vibration of the whole machine model. The comparative analysis with the on-site monitoring data shows that the numerical modal analysis and field monitoring results is relatively consistent. The numerical analysis of the dynamic response of the wind-induced wind turbine structure considering the fluid-solid coupling effect is close to the on-site monitoring vibration results, and the trend is consistent. The research results show that the whole machine numerical model and the numerical wind tunnel proposed in this paper are reliable and feasible for wind vibration analysis of the whole wind turbine structure, which provides a scientific basis for the structural design and vibration control simulation research of wind power installations, and have certain reference for wind vibration analysis of similar engineering structures.

Keywords: wind turbine founded on monopiles; site vibration monitoring; numerical simulation; p-y curve; fluid-structure coupling; different boundary condition

(编辑 方晶)