

张翼, 金波, 郑涛. 单桩式基础海上风电塔强振分析 [J]. 华南地震, 2020, 40 (4): 133-139. [ZHANG Yi, JIN Bo, ZHENG Tao. Strong Vibration Analysis of Single-pile Foundation Offshore Wind Power Tower [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (4): 133-139]

单桩式基础海上风电塔强振分析

张 翼¹, 金 波², 郑 涛²

(1. 国家电力投资集团有限公司, 北京 100029; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310000;)

摘要: 对某座风电场的 70 座单桩式海上风电塔基础振动及其中 7 座的塔筒进行了 1 年的振动监测, 统计了其在台风、偏航冲击等作用力下的强振特性。监测数据分析发现: 机舱对风向偏航时会引起塔筒强烈振动, 且此类型强振现象持续时间达几十秒, 有时塔筒顶部的振动加速度达到 14m/s^2 、基础振动加速度达到 3.5m/s^2 ; 在台风作用下, 塔筒的振动加速度值达到 12.5m/s^2 、基础振动加速度值达到 4.5m/s^2 ; 通过分析风电塔 1 年运营期间的塔筒固有频率值, 发现前 3 阶固有频率值、阻尼比未发现变化。监测结果表明: 单桩式风电塔在台风、机舱偏航时都会产生强烈振动。机舱偏航引起风电塔的强振现象过于频繁发生, 可能会引起风电塔出现振动疲劳, 应引起重视。研究成果可为此类型风电塔设计、运营安全监测及损伤诊断提供参考。

关键词: 强振; 单桩式海上风电塔; 台风; 偏航强振

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 04-00133-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.04.018

Strong Vibration Analysis of Single-pile Foundation Offshore Wind Power Tower

ZHANG Yi¹, JIN Bo², ZHENG Tao²

(1. State Power Investment Corporation Limited, Beijing 10029, China; 2. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The paper conducts the vibration monitoring for the foundation vibration of 70 mono-pile offshore wind power towers and 7 of the towers on a wind farm for one year, and calculates their strong vibration characteristics under the action of typhoon, yaw impact, etc. Monitoring data analysis shows that: the yaw of the nacelle against the wind direction will cause strong tower vibration, and this type of strong vibration lasts for tens of seconds, sometimes the vibration acceleration at the top of the tower reaches 14 m/s^2 , and the basic vibration acceleration is close to 3.5 m/s^2 ; under the action of the typhoon, the vibration acceleration value of the tower

收稿日期: 2020-06-25

基金项目: 中国电建集团华东勘测设计研究院科研专项“海上风电安全监测技术研究与应用”(KY2017-02-78); 国家电力投资集团有限公司科研专项“海上风机基础及升压站在线监测系统与分析平台构建”(DC170081Y)

作者简介: 张翼 (1962-), 高级工程师, 主要从事海上风电工程建设工作。

E-mail: 1450980520@qq.com.

is close to 12.5 m/s^2 , and the vibration acceleration value of the foundation is close to 4.5 m/s^2 ; by analyzing the natural frequency value of the tower tube during the one-year operation of the wind power tower, it is found that the natural frequency values and damping ratio of the first 3 orders have not changed. The monitoring results show that the single-pile wind power tower will generate strong vibration during typhoons and yaw impact. The strong vibration of the wind power tower caused by the nacelle yaw occurs too frequently, which may cause vibration fatigue of the wind power tower, which should be paid attention to. The research results of this paper can provide reference for the design, operation safety monitoring and damage diagnosis of this type of wind power tower.

Keywords: Vibration monitoring; Single-pile offshore wind power towers; Typhoon; Strong vibration of tower caused by yaw

0 引言

海上风力发电具有风力资源更丰富、靠近电力紧缺的大城市等优势^[1-5],在我国蓬勃发展。海上风电基础和塔筒是风力发电设备的支撑结构^[6-9]。其安全直接影响到机舱里的风机的安全^[10-13]。海上风电塔的类型按照其基础结构特性可分为单桩式、重力式、导管架式、多脚架式、吸力筒式、桩基—钢承台式、桩基—混凝土承台式,及其它新型结构形式^[3, 11]。

单桩式基础风电塔在我国的江苏、浙江等水深较浅的近海大陆架的软土地基大量使用^[11]。其结构如图 1、2 所示,由单根钢管桩、3~4 节塔筒及配套法兰盘连接而成。

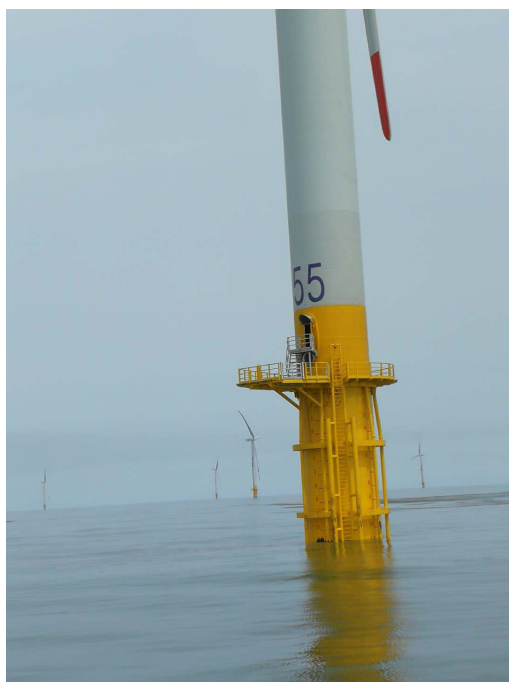


图 1 单桩式风电塔基础结构图

Fig.1 Foundation structure diagram of single-pile foundation offshore wind power tower

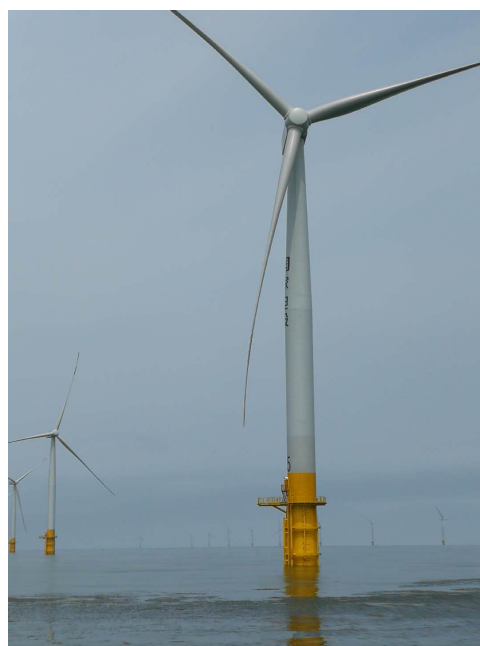


图 2 单桩式风电塔整体结构图

Fig.2 Overall structure diagram of single-pile foundation offshore wind power tower

振动是风电塔的主要结构动力响应。风电塔在台风、机舱对风向偏航等期间,都会产生强烈振动。此类强振会导致塔筒螺栓松动等振动疲劳,严重时会导致塔筒倒塌,是威胁风电塔运营安全的主要因素^[13-18]。如红海湾的某个风电场中的 13 座风电塔在台风作用下出现了叶片损坏、螺栓松动、塔筒基础混凝土开裂等严重损伤^[11]。我国的苍南风电场在某次台风期间其倒塌 5 座塔筒^[15]。金昌某个风电场的 20 多座塔筒存在机舱对风向偏航时振动过大的现象,运营未到 1 年,就出现了混凝土开裂、螺栓松动等损伤而停运维修^[15-18]。因此对风电塔实时强振监测是很有必要的,可为塔筒的安全运营和日常维修提供重要参考。

本文对某个海上风电场的 70 座单桩式风电塔开展了基础振动加速度在线监测, 及选择了其中 7 座塔筒开展了塔筒振动加速度监测。基于 1 年的监测数据分析, 发现基础和塔筒在台风期间, 机舱对风向偏航期间都会产生强振事件。尤其是机舱对风向偏航频繁发生, 进而导致基础和塔筒频繁强振, 很容易引起塔筒上的螺栓逐步松动、基础振动疲劳等损伤, 应该引起足够重视。

1 单桩式风电塔振动监测情况

所监测的 70 座单桩式海上风电塔位于江苏省某个海上风电场, 于 2018 年 6 月初投入使用。其基础结构如图 1、2 所示。单根钢管桩打入到土层 20~50 m, 露出水面大致 8~10 m, 然后通过过渡段及法兰盘与塔筒连接。塔筒长度为 80 m、壁厚为 16 mm。其 3 节塔筒由法兰盘和直径为 36 毫米的几百个螺栓连接而成。

本次监测在 70 座风电塔的单桩基础顶部都安装了 1 套 2 分量 QZ2013 型力平衡式加速度计, 在其中的 7 座风电塔的每节塔筒的塔顶安装了 1 套 2 分量 QZ2013 型力平衡式加速度计。QZ2013 加速度计由北京腾晟桥康科技有限公司研制, 有效频带为 0~200 Hz, 量程为 2 g, 精度为 0.00001 g; 可同步监测相互垂直的 2 个方向。传感器的一个方向朝主风向方向, 另外一个方向与之垂直, 呈水平布置。本次监测的配套采集仪为 G01NET-3F 型动态数据采集仪。此采集仪由北京腾晟桥康科技有限公司研制, 自带 16 G 存储, 采用 24 位模数转换芯片, 有 8 个同步采集通道, 最高采样频率为 2000 Hz。所监测数据通过海底光缆实时远程传输到岸上监控室, 由 G01NET-FDC 海上风电场建筑物动力响应安全监测与评估软件接收数据与分析。

此振动监测系统于 2018 年 12 月开始运行, 采样频率都设置为 50 Hz。

2 风电塔振动特性分析

2.1 固有频率变化分析

海上风电塔为典型的高耸建筑物, 振动能量主要集中在低频带段。本文对塔筒上安装了

振动加速度计的 7 座风机进行了固有频率的详细分析。在对其进行固有频率分析时, 首先对其振动加速度数据进行截止频率为 10 Hz 低通滤波, 然后进行自功率谱密度平均分析, 平均窗为 51 200×64。此次分析的频率分辨率为 0.001 Hz。

分析数据的选择情况如下: 选择 2018 年 12 月、2019 年 12 月的数据进行分析。每天选择 20 分钟的振动加速度数据进行自功率谱密度平均分析。所选择数据为塔筒振动较平稳且振动加速度值较小时的振动数据, 有利于减少海浪、台风、偏航冲击力等外部随机作用力的干扰; 然后对每天的分析结果求均值, 且以此均值作为本月的固有频率值。此类型风电塔的典型振动频谱图如图 3、图 4 所示。各塔筒的前 3 阶实测固有频率值及相对监测初期的变化率分别见表 2、3、4。

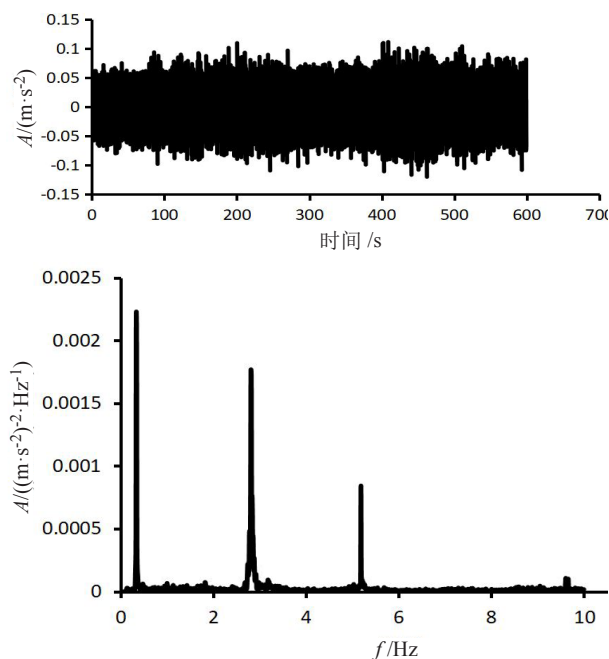
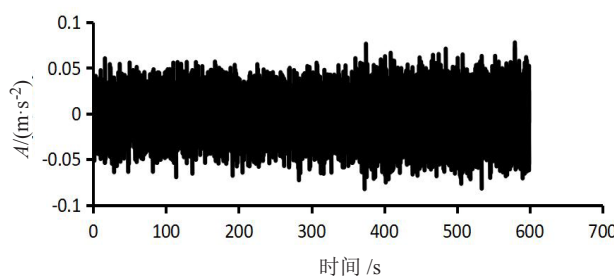


图 3 2018 年 12 月的典型振动加速度波形和频谱图
Fig.3 Typical vibration acceleration waveforms and spectrograms in December 2018



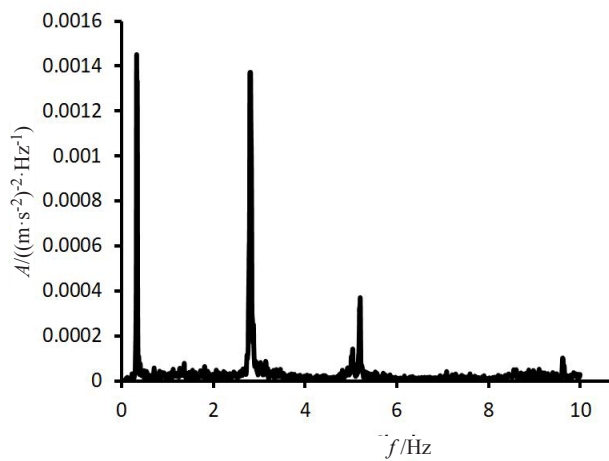


图 4 2019 年 12 月的典型振动加速度波形和频谱图
Fig.4 Typical vibration acceleration waveforms and spectrograms in December 2019

表 2 7 座风电塔在 2018 年 12 月、2019 年 12 月的 1 阶固有频率实测值统计表

Table 2 Statistics table of the measured values of the first-order natural frequency of 7 wind power towers in December 2018 and December 2019			
塔筒编号	2018 年 12 月	2019 年 12 月	变化率 / (%)
ZG43	0.352	0.356	1.13
ZG52	0.346	0.346	0
ZG53	0.350	0.352	0.57
ZG55	0.350	0.346	-1.15
ZG56	0.342	0.342	0
ZG62	0.338	0.340	0.59
ZG67	0.342	0.342	0

表 3 7 座风电塔在 2018 年 12 月、2019 年 12 月的第 2 阶固有频率实测值统计表

Table 3 Statistics table of the measured values of the second-order natural frequency measurements of 7 wind power towers in December 2018 and December 2019			
塔筒编号	2018 年 12 月	2019 年 12 月	变化率 / (%)
ZG43	2.936	2.936	0
ZG52	2.907	2.935	0.96
ZG53	2.942	2.935	-0.024
ZG55	2.963	2.961	-0.07
ZG56	2.849	2.792	-2.00
ZG62	2.898	2.905	0.24
ZG67	2.943	2.936	-0.24

表 4 7 座风电塔在 2018 年 12 月、2019 年 12 月的第 3 阶固有频率实测值统计表

Table 4 Statistics table of the measured values of the third order natural frequency of 7 wind power towers in December 2018 and December 2019			
塔筒编号	2018 年 12 月	2019 年 12 月	变化率 / (%)
ZG43	5.356	5.248	-2.01
ZG52	5.420	5.420	0
ZG53	5.237	5.237	0
ZG55	5.417	5.392	-0.46
ZG56	5.267	5.235	-0.61
ZG62	5.326	5.358	0.60
ZG67	5.348	5.348	0

由以上分析可得：7 座塔筒的前 3 阶固有频率值相比运营初期，在运营 1 年后，基本未出现变化，最大变化率为 -2.01%，表明 7 座塔筒都未出现影响整体动力响应特性的损伤。

本文对另外 63 座风机塔基于其基础振动数据进行了 1 阶固有频率分析，得出它们的典型时程波形和频谱图如图 5 所示，及固有频率全部介于 0.330~0.360 Hz 之间。

由此可见：70 座风机塔在运行 1 年后，固有频率基本没有变化。这表明 70 座风机的基础结构都未出现影响整体动力响应特性的损伤。

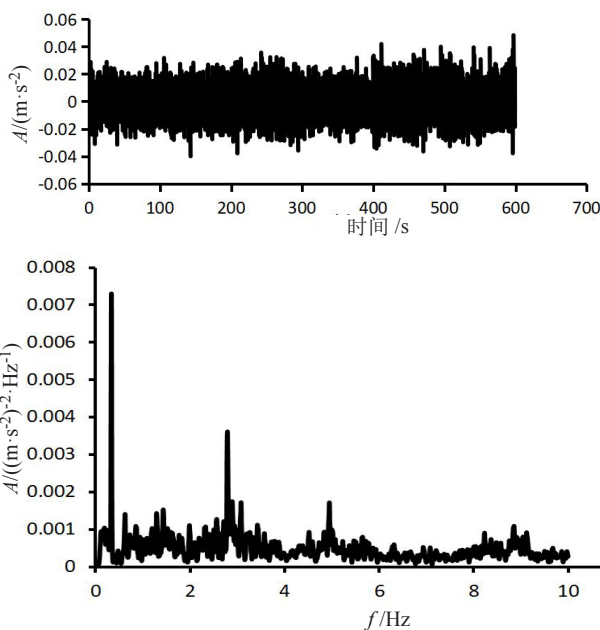


图 5 2018 年 12 月的典型振动加速度波形和频谱图
Fig.5 Typical vibration acceleration waveforms and spectrograms in December 2018

2.1 某次台风作用下，单桩式海上风电塔振动强度和频谱特性分析

在 2019 年 7 月，某次台风经过此风电场时，最大瞬时风速接近 35 m/s。监测系统记录了 70 座风电场塔筒在此次台风作用下的振动情况，具体振动强度统计如表 5、6 所示。典型瞬时风速、振动加速度波形、振动位移波形、频谱如图 6、7 所示。由于风机控制系统设置为风速大于 25 m/s 时自动停止运转及关闭自动对风向偏航，因此，在此次台风期间所记录的振动强度主要是由风荷载作用力和海浪冲击力引起的。

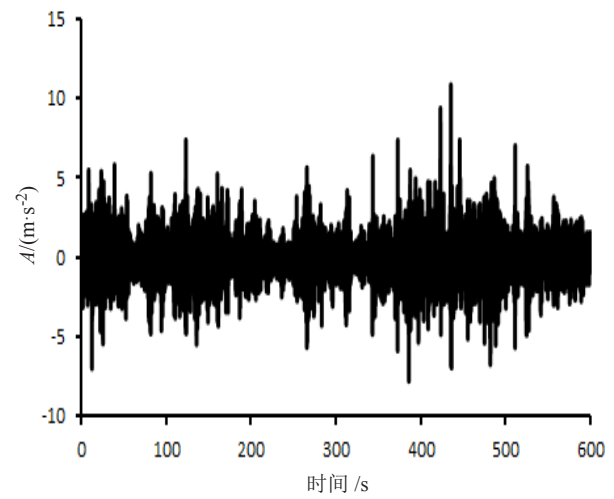


图 6 台风期间的塔筒顶部典型振动加速度波形
Fig.6 Typical vibration acceleration waveform of tower top during typhoon

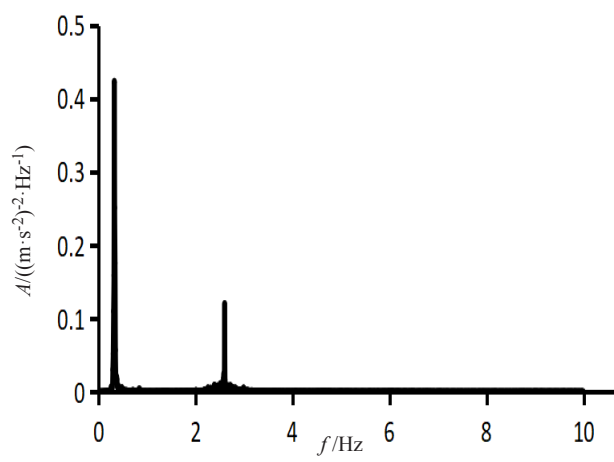


图 7 台风期间的典型振动加速度频谱图
Fig.7 Typical vibration acceleration spectrum during typhoon

表 5 某次台风期间塔筒的振动加速度最大值和风速最大值统计

Table 5 Statistics of maximum vibration acceleration and maximum wind speed of the tower during a typhoon			
塔筒编号	塔顶最大加速度值 / (m·s ⁻²)	基础最大加速度值 / (m·s ⁻²)	最大风速 / (m·s ⁻²)
ZG43	12.537	3.709	33.7
ZG52	11.065	2.972	31.9
ZG53	10.674	4.068	33.7
ZG55	11.308	4.560	34.9
ZG56	9.784	3.074	32.7
ZG62	12.065	3.428	33.2
ZG67	10.762	3.219	32.1

由表 5 可见：7 座塔筒在此次台风期间的振动强度大，如顶部振动加速度最大值达到 12.537 m/s²，基础振动加速度最大值达到 4.560 m/s²。因此，塔筒在台风作用下的结构振动放大效应非常明显。

对其它 63 座风机在此次台风期间的基础振动加速度最大值进行了分析，得出其值介于 2.5~5 m/s²；对其微风期间的基础振动加速度最大值进行了分析，得出其值介于 0.01~0.2 m/s²。因此，相比微风期间的振动加速度，此类型风机基础在台风期间的振动加速度增大了几十倍。

2.3 日常机舱偏航时的振动强度统计

机舱对风向偏航是风机工作期间常发生的事情。风机偏航时，机舱底部齿轮箱的上、下齿轮会相对运动，进而引起塔筒的强烈振动。此类振动信号的典型加速度波形如图 8 所示，持续时间虽然较短，但是振动加速度值都较大。为了分析单桩式风电塔由偏航引起的强振动事件情况，本文统计了 7 座单桩式风电塔在 2019 年 3 月和 2019 年 9 月共计两个月的内由偏航引起的振动加速度最大值，及塔顶振动加速度超过 3 m/s² 的强振事件次数。统计结果如表 6、7 所示。

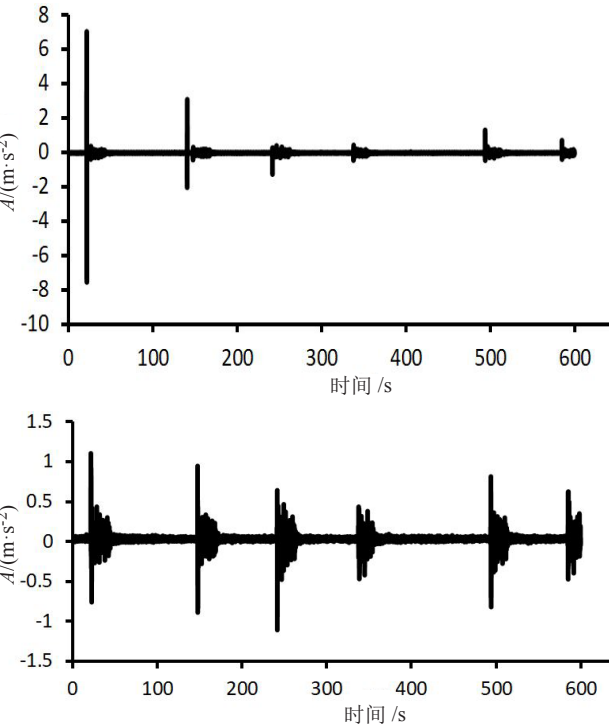


图 8 塔筒在机舱偏航时的典型振动加速度波形
Fig.8 Typical vibration acceleration waveform of the tower during the yaw of the nacelle

表 6 2019 年 3 月偏航时引起塔筒的振动强度统计
Table 6 Statistics of vibration intensity of the tower caused by yaw in March 2019

塔筒 编号	塔顶最大加速 度值 / (m·s ⁻²)	基础最大加速 度值 / (m·s ⁻²)	偏航强振次 数 / (m·s ⁻²)
ZG43	9.634	1.583	106
ZG52	1.709	2.043	87
ZG53	8.538	1.384	23
ZG55	3.906	2.957	279
ZG56	2.860	2.438	309
ZG62	7.306	0.872	53
ZG67	7.943	0.757	74

表 7 2019 年 9 月偏航时引起的各塔筒的振动强度统计
Table 7 Statistics of vibration intensity of each tower caused by yaw in September 2019

塔筒 编号	塔顶最大加速 度值 / (m·s ⁻²)	基础最大加速 度值 / (m·s ⁻²)	偏航强振 次数 / (m·s ⁻²)
ZG43	2.782	1.792	297
ZG52	2.958	3.476	263
ZG53	9.063	1.983	284
ZG55	3.253	3.052	396
ZG56	4.083	3.508	493
ZG62	7.859	1.256	206
7	9.487	1.580T	264

由表 6、7 可见：机舱对风向偏航时会导致塔筒强振。顶部的最大晃动加速度普遍较大，如编号 ZG56 的塔筒顶部在 2019 年 9 月的最大加速度达到了 14.083 m/s²，基础的最大加速度达到了 3.508 m/s²。

机舱对风向偏航引起塔筒强振的事件频繁发生。本文以 3 m/s² 为阈值，统计了 7 座塔筒在 2019 年的 3、9 月由偏航引起的强振事件。在判断时，首先查询机舱偏航记录，然后查询每次偏航时间内的振动加速度最大值。多座塔筒在一个月里发生的强振事件超过了 100 次，尤其是 9 月里，7 座塔筒的偏航强振事件都超过了 200 次，如编号为 ZG59 的塔筒达到了 493 次。

(3) 对比所统计的两个月的强振事件可见：塔筒在 9 月里，由机舱对风向偏航引起的振动强度普遍增大，强振事件也明显增多。其原因主要是 9 月里此风电场的风向频繁变化。

以上分析说明机舱对风向偏航引起的塔筒强振事件是普遍存在的现象。其发生频率高，振动强度大。因此，塔筒因偏航频繁发生强振现象，会容易导致其振动疲劳和影响使用寿命，应引起足够重视。

3 结论

本文对 70 座单桩式海上风机基础和塔筒进行了振动监测，详细分析了 7 座在台风、日常运营期间的振动特性，得出以下结论：

(1) 两座单桩式风电塔在建设以后的 1 年运营期间，塔筒的前 3 阶固有频率值基本没有变化。

(2) 塔筒在台风期间的振动强度大，如在某次台风期间的顶部振动加速度最大值达到 12.537 m/s²，基础振动加速度最大值达到 4.560 m/s²；相比微风期间的振动强度，基础振动加速度普遍增大了几十倍。因此，此类型塔筒在台风作用下的结构振动放大效应非常明显，且振动强度较大。

塔筒因为机舱偏航而频繁发生强烈振动。在统计的 2 个月里，最大值大于 3 m/s² 的强振事件的次数有时一个月里接近 500 次)、振动加速度值普遍较大，如编号 ZG56 的塔筒顶部在 2019 年 9 月的最大加速度达到了 14.083 m/s²，

基础的最大加速度达到了 3.508 m/s^2 。因此，偏航引起的塔筒强振现象，会导致塔筒振动疲劳，进而导致法兰盘螺栓松动损伤、基础混凝土开裂等疲劳损伤等，应足够重视。

参考文献：

- [1] 何先龙, 余天莉, 徐兵等. 基于塔筒振动特性识别风机塔螺栓松动的研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35 (14) : 112-118.
- [2] 王玉冰. 基于原型观测的海上风电结构振源和横风向振动研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [3] 邓伟, 金波, 郑涛, 等. 高桩混凝土承台式海上风电塔强振动分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40 (1) : 233-239.
- [4] 魏泰, 吴坤, 黄军威. 风机塔筒螺栓防松检测技术 [J]. 机械与电子, 2013 (8) : 78-80.
- [5] Caselize p, Giebhardt j. Rotor Condition Monitoring for Improved Operational Safety of Offshore Wind Energy Converters [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127 (2) : 253-261.
- [6] Caselitz P, Giebhardt J, Mevenkamp M. On-line fault detection and prediction in wind energy converters [C]// Institut fur Solare Energieversorgungs technik (ISET) e.V. Thessaloniki: EWEC, 1994
- [7] 缙百勇, 陆秋海, 王波等. 利用固有频率异常值分析法检测螺栓拧紧力 [J]. 振动与冲击, 2015, 34 (23) : 77-82.
- [8] 余坚, 谢寿生, 任立通, 等. 拉杆转子装配振动检测分形研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33 (14) : 84-88.
- [9] 李允公, 孔祥娜, 高玉勇. 基于两被联件振动信号概率密度和 PCA 的螺栓松动识别方法研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34 (1) : 63-67.
- [10] Loutas.T.H, Sotiriades.G, Kalaitzoglou.I, et al. Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements [J]. Applied Acoustics, 2009, 70 (9) : 1148-1159.
- [11] 李源, 曾宇, 陈昌林. 不同单元类型风机塔筒振动特性比较研究 [J]. 东方电机, 2012 (5) : 43-46.
- [12] RACHID Y, ISMAIL E B, TRITSCH J B, et al. Dynamic study of a wind turbine blade with horizontal axis [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2001, 20 (2) : 216-225.
- [13] MURTAGH P J, BASU B, BRODERICK B M. Mode acceleration approach for rotating wind turbine blades [J]. Journal of Multi-Body Dynamics, 2001, 21 (8) : 241-252
- [14] P.J.Murtagh, B.Basu, B.M.Broderick. A long-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading [J]. Engineering Structures, 2015, 27 (8) : 1209-1219
- [15] 刘貽雄. 大型风力机塔筒结构动力学与稳定性分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学硕士论文, 2012.
- [16] Ren Wei-xin, De Roeck, G. Structural damage identification using modal data. I: Simulation Verification [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128 (1) , 87-95.
- [17] Raffa F A, Vatta V. The dynamic stiffness method for linear rotor-bearing system [J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2016, 118 (7) : 332-339.
- [18] Verbruggen T W. Wind turbine operation & maintenance based on condition monitoring WT-O [R]. Final Report, ECN-C-03-047, 2003.