DOI:10.11705/j. issn. 1672 -643X. 2015. 03. 40

风机开停过程中海上风电结构振动特性研究

王玉冰,王海军,董霄峰
(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘　要: 基于现场振动试验,分析了海上风电结构在不同风况下风机开停过程中的振动规律。结果表明:针对试验样机,不同风级开机工况风电结构振幅均比正常运行时更大,范围在 11.23% ~58.45%;不同风级停机工况风电结构振幅波动剧烈,与正常运行比较变化范围在 -25.73% ~387.33%。采用 STD 方法识别出风电结构整体首阶频率为 0.33Hz。同时开展了风机塔筒摆幅分析,结果证明该风电结构在开停机过程中能够满足结构安全要求。

关键词: 海上风电结构; 现场振动试验; 开停机; 振动幅值
中图分类号:TK81　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2015)03-0193-04

Research on vibration performance of offshore wind power structure in process of unit start and stop

WANG Yubing, WANG Haijun, DONG Xiaofeng
(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: Based on site vibration test, the paper analyzed the vibration law of offshore wind power structure in process of unit start and stop. The data show that the vibration amplitude of wind power structure in different work conditions is larger than that in normal running of unit. The range of variation is from 11.23% to 58.45% in start process. The amplitude range is from -25.73% to 387.33% compared with that in normal operation in stop process. It used STD method to recognize the first frequency of wind and power structure that is 0.33Hz. At the same time, the paper carried on the analysis of oscillation range of tower. The result showed that wind and power structure can meet the requirement of structure safety.

Key words: offshore wind power structure; site vibration test; start and stop of unit; vibration amplitude

风机的开机和停机是发电机运行发电和脱离电网的重要过程,也是正常发电不可或缺的环节。风机在开停机过程中,风电结构所受荷载作用会发生快速的变化,结构分别出现加载和卸载的过程,因此该变化过程中风电结构安全振动问题值得注意[1-2]。目前国内外对风机开停过程海上风电结构振动特性研究较少,现场振动试验研究就更少了,因此有必要在该方面开展更深入的研究[3~5]。论文基于现场原型振动观测数据,分析了海上风电结构在不同风况下风机开停过程中的振动规律,并开展了结构动力响应评估,研究结果为工程的安全运行提供支持。

1　现场振动试验

为了能够全面反映整个风电结构振动变化情况,从风机塔筒顶部到连接法兰区域共布置了 5 层,每层 3 支,共 15 支传感器;传感器皆为 DPS 型地震式低频振动位移传感器,型号主要为 DPS-0.2-5-H(v)和 DPS-0.1-0.2-H,其中后者的位移振幅测量可达到 ±1m,能够满足塔筒顶部的水平向位移变化;每层 3 支传感器分别为 2 支水平向传感器(X 方向和 Z 方向),1 支垂向传感器(Y 方向);测试系统为 INV 智能信号采集仪,具有 32 个并行采集通道,最高采样频率可达 200 kHz。测点布置图见图 1[6]。

收稿日期:2014-12-18;　**修回日期**:2015-01-05
基金项目:国家国际科技合作专项(2012DFA70490); 天津市应用基础及前沿技术研究计划(青年基金项目)资助项目(12JCQNJC04000)
作者简介:王玉冰(1988-),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究海上风电结构动力特性。
通讯作者:王海军(1978-),男,江西萍乡人,副教授,研究方向:水工结构静动力分析。

测试工况:开机工况 3 组,对应的风速为 4.0、5.5 和 8.4 m/s;停机工况 4 组,对应的风速为 5、7.6、9.0、10.7 m/s。数据采集时间为 150 s,采用频率为 200 Hz。

2 振动测试数据分析

2.1 开机过程工况测试数据分析

各风速下,按照风电结构的不同振动特性将整个振动过程分为 4 个阶段,分别为停机状态、过渡过程、开机过程以及运行状态。塔筒顶部测点在 5.5 m/s风速下开机时水平 Z 向振动位移曲线见图 2(a),频谱瀑布图见图 2(b)。从图中可知,前 60s 为开机前的风机停机状态,由于受环境荷载作用,结构振动幅度较小,幅值在 5 ~7 mm;风机开机后 30 ~40 s 内(过渡过程),机组进入预转动阶段,转轮叶片并未完全开始转动。此时风电结构振动主要为受环境荷载和机组机械荷载共同激励下的振动,风电结构振幅变化较小;随后 30 s 内(开机过程),风机叶轮完全开始转动并且转速继续增大,从振动位移时程图可以看出,风电结构振幅在开始阶段有明显地增加,最大可达 37 mm,直至达到相应最大转速后平稳运行;机组进入平稳运行后,机组以正常运行状态工作,风电结构振动也基本趋于稳定。

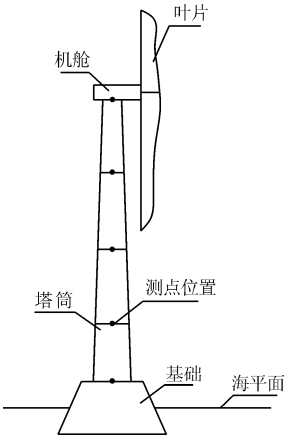
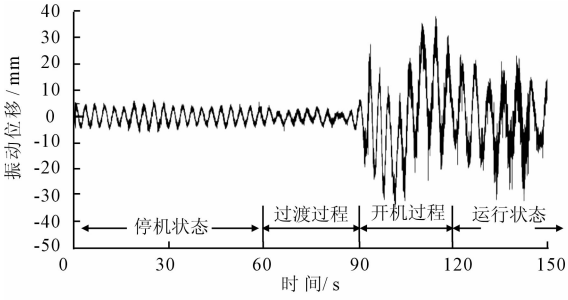
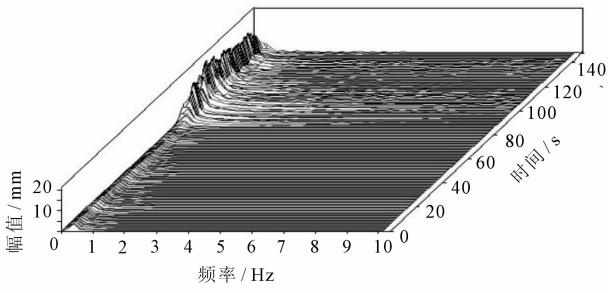


图 1 测点布置示意图



(a) 位移时程图



(b) 振动瀑布图

图 2 开机工况顶部测点水平 Z 向振动位移时程图和振动瀑布图(5.5 m/s 风速)

从图 2(a)中可知,开机过程阶段风机塔筒顶部振动水平振幅相比其稳定运行时要略大。从图 2(b)中可知,测试信号前 60 s 内风电结构振动较为平缓,振动的主频率集中在 0.33 Hz 附近,可能为受环境荷载激励的风电结构整体固有频率;过渡过程内结构振动在幅值和频域特性上基本与停机状态一致;进入开机过程后,频谱的幅值显著增大,而频率值逐渐减小,主频集中在 0.2 Hz 左右。该频率的出现与风机转频有关,说明开机前后引起风电结构振动的激励发生了变化,风机旋转状态下的风荷载、机组机械和电磁等荷载导致风电结构振动。

分别计算各测点在 3 种风速开机过程与正常运行的振动均方根值相差百分比,如表 1 所示。经分析可知,在不同风况条件的开机工况下,风机结构不同测点各方向的振动相比于机组正常运行工况下均有明显增大,最大增加 58.45%。其中,在 4.0、5.5 和 8.4 m/s 风速条件下各测点振动均方根值分别平均增长 23.2%、46.9% 和 26.8%。对应结构顶部振动均方根值分别为 13.48、15.46 和 26.22 mm,最大振动位移幅值分别为 28.10、30.85、61.21 mm。

海上风机结构的水平位移主要为风机塔筒的位移,而风力发电机塔架作为一种特殊的高耸钢结构形式,国内尚无统一标准。根据 GB50135 -2006《高耸结构设计规范》中规定以风为主要荷载标准组合为主下的高耸结构如按线性分析水平位移不得大于该点总高度的 1/75[7]。文献[8]中作者通过刚度理论推导认为要确保塔架的性能要求,风机塔架的允许水平位移值应该在该点离地高度的 0.5% ~ 0.8%之间。由于本次测试选择基础顶盖与地基接触平面为基准面,则风机结构 5 个测点位置距地面高度分别约为 18、23.5、39、67 和 97 m。选取 0.5% 作为水平位移限值比例,从风机塔筒顶部到底部的

各测点水平方向位移允许值见表 2。将各测点最大水平位移幅值与表 2 中数值比较,测试工况下该风机塔筒水平水位能够满足要求。

表 1　不同风况下风机机组开机过程与正常运行阶段振动均方根值对比表

测点序号	测点方向	与正常运行相比增加/%		
		风速 4.0 m/s	风速 5.5 m/s	风速 8.4 m/s
1#	X	17.04	42.00	33.82
	Z	32.89	35.19	24.14
2#	X	17.08	47.18	31.39
	Z	44.79	58.45	44.33
3#	Y	24.73	47.71	25.76
	X	18.38	49.95	23.53
4#	Y	18.91	49.84	24.39
	Z	20.15	44.60	22.33
5#	X	11.23	48.54	15.83
	Y	26.19	46.53	26.27
	Z	23.30	46.17	23.09

表 2　风机振动测试各测点水平方向位移允许值

测点	1	2	3	4	5
允许值/m	0.48	0.33	0.19	0.11	0.09

2.2　停机过程工况测试数据分析

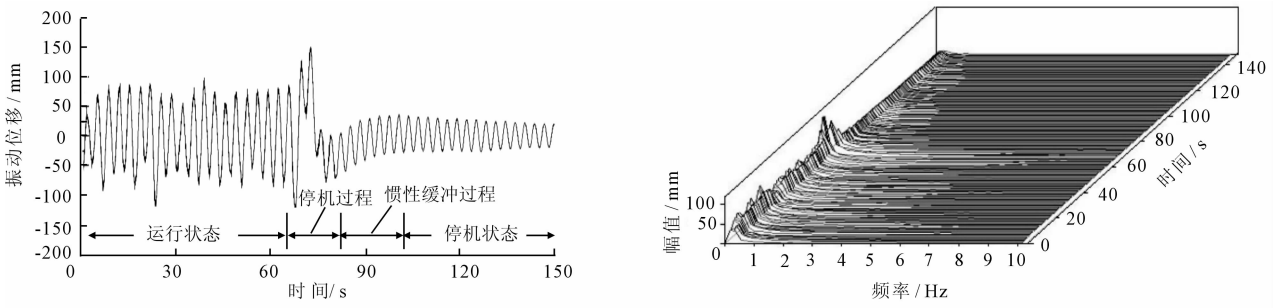
各风速下,按照风机结构的不同振动特性将整个停机工况分成运行状态、停机过程、惯性缓冲过程以及停机状态 4 个阶段,如图 3(a)所示。取 10.7 m/s 风速下风机停机作为典型工况,图 3(a)中绘出了塔筒顶部测点水平 Z 向振动位移时程图。从图中可知,测试数据的前 70 s 为停机前的风机正常运行情况下结构振动响应数据,振动较为平稳,振源主要为环境荷载、机组机械荷载和电力荷载的联合激励;停机操作开始后,结构振动受到机组刹车制动的影响,幅值在短时间内出现突变,振动幅度明显增加;随后的 20 ~ 30 s 内, 由于结构自身惯性作用,风机还需一段时间才会趋于平稳振动直至达到停机状态;进入停机状态后,风机只受到来自外部环境的影响,结构振动比运行状态时显著降低。相比于停机后信号的单一周期、小幅值的特性,停机前振动信号则呈现明显的大幅值、多周期叠加信号的特征。与开机过程相比,停机过程可以在较短的时间内完成,这是由于机组开机时需要达到一定的转矩,叶轮才能够旋转运行直至稳定,而停机过程则可以通过刹车系统短时间内使机组停止运行。

从振动时程图中可以看出,停机过程的结构振动幅度与正常运行阶段的结构振动幅度存在一定的差异,为了更加详细地说明和解释这一现象,图 3 中绘出了风速 10.7 m/s 条件下停机工况顶部测点水平 Z 向振动位移时程图和振动瀑布图。从图中可以看出,停机工况大约前 70 s 内结构处于正常运行状态,振动幅度较为平缓,主要为低于 0.30 Hz 的低频振动,与此时叶轮转频(0.30 Hz)影响存在密切联系。机组停机后,瀑布图在峰值上明显出现了较大突变,频域内对应的幅值在短时间内迅速增加,随后逐渐减小,待振动幅值再次稳定后,结构振动频率处于 0.33 Hz 附近,由于此时结构主要受到来自环境荷载的影响,这一频率可能为结构固有模态频率,这同样说明在停机前后结构振动形式也发生了变化。此外,从停机瀑布图中还能明显看出,风机结构在停机过程中的振动幅度要大于正常运行状态下的结构振动幅度。故风机结构在停机过程阶段振动的安全性需进一步确定。分别计算各测点在测试的 4 种风速下停机过程阶段与正常运行阶段的振动均方根值,以及前者相比于后者增加的百分比,如表 3 所示。

经分析可知,在不同风况条件的停机工况下,风机结构不同测点各方向的振动信号相比于机组正常运行工况下绝大部分均有明显增大。其中,在 5.0、7.6、9.0 和 10.7 m/s 风速条件下的各测点振动均方根值最大增长分别为 22.75%、387.33%、221.20% 和 56.72%,平均增长分别为 6.38%、144.44%、85.66% 和 14.04%。停机过程中塔筒顶部水平向最大振动均方根值分别为 12.38、37.87、33.68和 65.75 mm,相应的振幅最大值为 31.2、57.1、84.3和 151.2 mm。与振动响应评价标准相比,海上风机结构在停机阶段的振动仍满足规范的要求。但在风速 5.0 和 9.0 m/s 风况条件下,个别信号停机过程中的振动幅值相比正常运行工况有所下降,最大下降百分比分别为 12.95% 和25.73%。此种状况主要集中在 X 方向的振动响应。

3　基于停机工况振动信号的动态参数识别

从图 3 中可以发现停机工况一共经历了 4 个阶段,其中后 3 个阶段分别为停机过程、惯性缓冲过程和停机状态。从惯性缓冲过程开始,整个风电结构振动可视为自由振动响应,即由停机荷载引起的整个结构的自由衰减振动。



(a) 位移时程图　　(b) 振动瀑布图

图 3　停机工况顶部测点水平 Z 向振动位移时程图和振动瀑布图(10.7 m/s 风速)

表 3　不同风况下风机机组停机过程与正常运行阶段振动均方根值对比表

测点序号	测点方向	不同风速与正常运行相比增加/%			
		风速 5.0 m/s	风速 7.6 m/s	风速 9.0 m/s	风速 10.7 m/s
1#	X	-10.76	256.72	130.87	5.21
	Z	2.58	83.61	114.47	30.37
2#	X	-12.95	387.33	221.20	7.45
	Z	21.07	113.49	209.23	56.72
3#	Y	22.75	72.09	67.21	2.51
	X	-5.94	170.61	-1.08	17.46
4#	Y	16.69	83.57	59.09	1.64
	Z	12.35	65.16	52.93	2.20
	X	-8.21	163.00	-25.73	9.06
5#	Y	18.45	107.52	58.13	14.15
	Z	14.14	85.69	55.91	7.71

为了提取振动信号的结构模态参数采用了 STD (Spare Time Domain)方法进行分析。STD 法可对结构自由振动响应的位移、速度或加速度时域信号进行模态识别的方法,其计算速度快、精度高。其原理与 ITD (Ibrahim TIme Domain) 法一样,但构造了 Hessenberg 矩阵,从而避免了对求特征值的矩阵进行分解。具体如下[9-10]:

构造自由振动响应矩阵和自由振动延时响应矩阵。设 Δt 为时间间隔,取包括实际和虚拟测点的 $M(=2N)$ 个测点 $L(>2N)$,N 为系统自由度个数。则响应矩阵$[X]$与延时响应矩阵$[\tilde{X}]$可表示如下:

$$[\tilde{X}] = [X][B] \tag{1}$$

且矩阵$[B]$具有如下形式:

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_2 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & b_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & b_M \end{bmatrix} \tag{2}$$

可得到:

$$[X]\{b\} = \{\tilde{x}\}_M \tag{3}$$

式中:$\{b\} = [b_1, b_2, \cdots, b_{2N}]^{\mathrm{T}}$,$\{\tilde{x}\}_M$ 为矩阵$[\tilde{X}]$的第 M 列元素。

则$\{b\}$的最小二乘解可用伪逆法表示为:

$$\{b\} = ([X][X]^{\mathrm{T}})^{-1}[X]^{\mathrm{T}}\{\tilde{x}\}_M \tag{4}$$

将已知$\{b\}$代入,可得到$[B]$,根据 STD 理论,从矩阵$[B]$的特征值 $e^{s_r \Delta t}(r = 1, 2, \cdots, 2N)$ 中即可获得频率和阻尼等信息。

采用 STD 对各测点在停机工况的模态参数识别结果见表 4。

表 4　各测点水平向振动信号模态参数识别结果

阶次	1#测点		2#测点		3#测点		4#测点	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	0.33	1.88	0.33	0.57	0.33	2.10	0.33	1.70
2	2.74	8.55	3.30	18.0	2.61	7.20	2.81	6.41

从表 4 可知,试验样机的第一阶频率为 0.33 Hz,阻尼比在 0.57% ~1.88% 之间,振型为 1 阶弯曲;第二阶频率为 2.61 ~3.3 Hz,阻尼比在 6.41% ~18.0% 之间,振型为二阶弯曲。识别的出风电结构首阶频率与开停机工况中的停机状态时振动频率瀑布图的主频一致,与振动数据分析中的结论也是吻合的。

(下转第 201 页)

(1) 导流口长短轴 $L_1/L_2 = 3:1$ 的设计相较于其他两组,不仅起到聚流效果还可以减少装置耗材问题。

(2) 模型分析和数值模拟表明,在导流罩形状设计时,向外弯曲一定弧度的 A 型导流罩对外部流体的聚流效果最佳。

(3) 导流罩起始角度为 45°时,装置对海浪能利用值达到最大。在对 15° ~ 80°的开始转动角度值选择比较时,波能利用效率最大差值 0.033。

(4) 试验装置的验证测试结果与模拟分析结果趋势一致,说明 RNG 湍流模型对装置模拟处理的可靠性。

参考文献:

[1] 蔡 男,王世明. 波浪能利用的发展与前景[J]. 国土与自然资源研究,2012(6):92 - 94.

[2] Faure T D, Pratte B D, Swan D. The darrieus hydraulic turbine model and field experiment[C]//. 4th Int. symposia on hydropwer fluid machine, 1986:123 - 129.

[3] Ponta F L, Jacovkis P M. A vortex model for darrieus turbine using finite element techniques [J]. Renewable Energy, 2001, 24 (1):1 - 18.

[4] Roger Bedard, Mirko Previsic, Omar Siddiqui, et al. EPRI north american tidal in stream energy conversion feasibility demonstration project [R]. EPRI Survey and Characterization, California, 2005.

[5] 刘 斌. 带导流罩的竖轴潮流水轮机水动力性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.

[6] 孙 科. 竖轴 H 型叶轮及导流罩流体动力性能数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.

[7] 赵 峰,陈延信,刘文欢,等. 不同形式导流板对旋风器性能影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2007,26(2):242 - 246.

[8] 李 虹,刘维柱. 微型轴流风扇结构改进的数值与实验研究[J]. 机械设计,2014,31(9):75 - 81.

[9] 左宝来. 皮带转运站用 LJD 除尘器的流场分析[J]. 中国科技博览,2011,24(2): 87 - 89.

[10] 阎 超,于 剑,徐晶磊,等. CFD 模拟方法的发展成就与展望[J]. 力学进展,2011,41(5): 562 - 589.

(上接第 196 页)

4 结　语

基于海上风电试验样机现场振动试验,分析了海上风电结构在不同风况下风机开停过程中的振动规律,主要结论如下:

(1)根据不同风级开停机过程风电结构振动规律,将风电结构开机振动过程分为了停机状态、过渡过程、开机过程和运行状态 4 个阶段;停机振动过程分为了运行状态、停机过程、惯性缓冲和停机状态 4 个阶段。

(2)试验样机在不同风级开机工况风电结构振幅均比正常运行时更大,范围在 11.23% ~ 58.45%;不同风机停机工况风电结构振幅波动剧烈,与正常运行比较变化范围在 - 25.73% ~ 387.33%。

(3)各测点水平位移幅值与其高度比值能够满足 0.5% 的要求,该风电结构在开停机过程中能够满足结构设计要求。

(4)采用 STD 方法识别出风电结构整体自称频率,首阶频率为 0.33 Hz。

参考文献:

[1] 祝 贺. 直驱永磁风力发电机组数学模型及并网运行特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2013.

[2] 田茂金. 海上风机支撑结构疲劳寿命分析方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.

[3] Vicente Negro, José - Santos López - Gutiérrez, Dolores Esteban M, et al. Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines[J]. Renewable Energy, 2014, 63:125 - 132.

[4] 李凯文,宋 波,黄 帅. 考虑流固耦合效应的海上单桩式风电塔动力响应研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(4):318 - 324.

[5] 黄维平,刘建军,赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程,2009,27(2):130 - 134.

[6] 董霄峰 王海军. 海上风电复合筒型基础样机振动试验报告[R]. 天津:天津大学,2013.

[7] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检疫总局. GB50135 - 2006 高耸结构设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[8] 王 峰,陈 棋,余国城. 大型风力发电机组塔架刚度的研究[J]. 能源工程,2005(6):38 - 40.

[9] 练继建,王海军,秦亮. 水电站厂房结构研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[10] 王 济,胡 晓. Matlab 在振动信号处理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.