

考虑重力的风机叶片水平加载测试方法

许晓燕 张会杰 游少雄 赵江澎

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 在风电叶片三维有限元参数模型中引入了重力产生的附加载荷,仿真计算了风电叶片水平加载方式的静载荷测试中附加载荷产生的水平方向的耦合位移,分析了耦合位移对测试过程中理论计算结果的影响;由于重力的叠加效应,测试中某些截面实际施加的等效载荷可能远超叶片设计的目标测试载荷,建议联合有限元分析,优化叶片安装角度和加载力方向的方法,降低叶片局部截面实际施加等效载荷的过载峰值。

关键词 风机叶片,静载荷测试,水平加载

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.02.021

Effects of Gravity in Horizontal Loaded Static Test for Wind Turbine Blade

XU Xiaoyan ZHANG Huijie YOU Shaoxiong ZHAO Jiangpeng

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Both of the attaching loads and the coupling displacements of gravity in horizontal loaded static test for wind turbine blade is analyzed in this paper. The numerical results show that the superimposition of gravity has great effect on the measured values, which lead to the risk of overloading the target load in some section. In order to reduce the overloading peak value of the equivalent load, it is suggested that the comprehensive application of optimizing installation angle of the blade and loading direction should be used based on FEM.

Key words Wind turbine blade, Static test, Horizontal load

0 引言

在风电行业,目前风力发电叶片静载荷测试主要有两种加载方式:垂直加载和水平加载,垂直加载方式又分为垂直向上加载和垂直向下加载。无论采用哪种加载方式,在进行测试前第一步都要平衡重力(叶片自身重力、夹具重力)的影响^[1-3]。

叶片测试过程中采用垂直加载方式时,施加载荷和重力方向在同一直线上,通过吊丝配重法调整施加载荷的大小就可以实现重力的平衡,基本原理是采用吊丝竖直向上拉力来平衡空间重力^[4]。

叶片测试过程中采用水平加载方式时,目前测试机构一般采用带滑轮的支架支撑于加载位置附近以抵消部分叶片重力,但由于叶片具有较高的结构非线性,在整个加载过程中叶片变形复杂,随着载荷逐级增大叶片可能脱离或压向支架造成重力抵消失效,同时测试现场区域布局很可能会限制了支架的安装,使得通过支架难以消除重力影响。以至于目前水平加载方式测试过程中大多不考虑重力的作用。随着叶

片尺寸逐渐增大^[5-6],测试过程中叶片会出现较大变形,使垂直加载方式受到测试空间的限制,水平加载方式在测试过程中得到越来越多的应用,重力的影响也日益凸显,然而到目前为止,重力对风力发电叶片水平加载静载荷测试影响的研究还不够。

为了更好的研究风电叶片水平加载方式静载荷测试中重力对测试结果的影响,并给实际生产提供科学的参考,以某2 MW风力发电叶片为研究对象,分析了重力产生的附加载荷,以及附加载荷产生的耦合位移对测试结果的影响。

1 有限元模型

根据叶片几何外形数据和叶片的铺层信息,建立叶片几何模型,并对其进行有限元网格划分和铺层,建立有限元模型,模型中包含了25 948个4节点四边形壳体单元,25 138个节点。

根据各加载点的位置、夹具尺寸、叶片截面和夹具的相对位置关系,建立夹具有限元模型,通过MPC单元与叶片连接。

收稿日期:2014-08-02

作者简介:许晓燕,1982年出生,硕士,主要从事大型复合材料结构设计仿真方面的研究。E-mail:xuxiaoyan2001@126.com

通过在夹具的吊点施加载荷来模拟水平加载测试加载。采用三点加载,位置如图1所示,第1加载点在距离叶根端面轴线距离为13 m处;第2加载点在距离叶根端面轴线距离为25 m处;第3加载点在距离叶根端面轴线距离为36 m处。

测试过程中风力机叶片叶根同轮毂刚性连接,故约束条件采用叶根固定的方式(约束叶根三个平动位移和三个转动位移)。

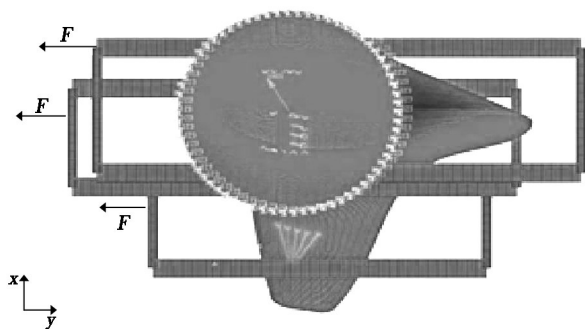


图1 最大摆向弯矩试验

Fig. 1 Max edgewise bending moment test of wind turbine blade

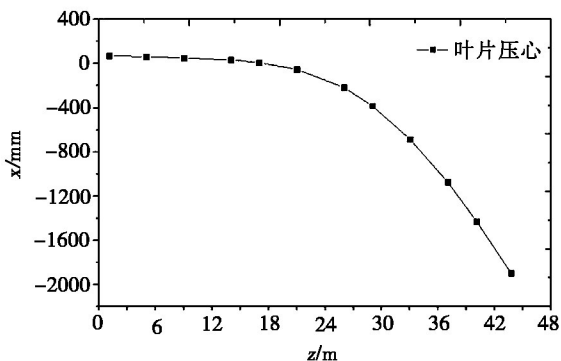
2 重力影响分析

叶片静态试验工况包括最大摆向弯矩试验、最小摆向弯矩试验、最大拍向弯矩试验和最小拍向弯矩试验工况。以最大摆向弯矩试验工况为例分析重力对水平试验的影响,

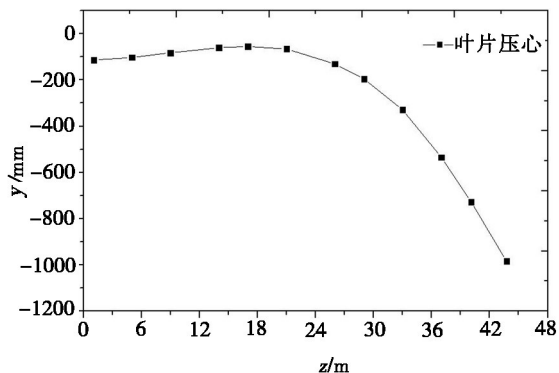
图1给出了最大摆向弯矩试验工况时叶片的安装姿态及载荷施加方向,第1加载点载荷为29.7 kN,第2加载点载荷为36 kN,第3加载点载荷为85 kN,三个加载点的载荷方向均沿y轴负方向。叶片的重力方向沿x轴负向。

叶片静态试验的目的是为了测定叶片的结构性能和作为叶片认证的标准,需要使每个截面的弯矩包络各气动工况的最大弯矩,本文提取典型截面的弯矩,并对不考虑重力和考虑重力影响的截面弯矩和扭矩进行对比分析。

图2为选取的叶片典型截面压心坐标的z-x和z-y曲线。



(a) z-x 坐标



(b) z-y 坐标

(图2 各典型截面的压心坐标

Fig. 2 Pressure center distribution for typical section of wind turbine blade

叶片各典型截面的弯矩通过公式(1)计算得到,

$$\begin{cases} M_x = F_z \cdot d_y - F_y \cdot d_z \\ M_y = F_x \cdot d_z - F_z \cdot d_x \\ M_z = F_y \cdot d_x - F_x \cdot d_y \end{cases} \quad (1)$$

不考虑重力影响的水平加载测试时, $F_x = F_z = 0$,故公式(1)可简化为

$$\begin{cases} M_x = -F_y \cdot d_z \\ M_y = 0 \\ M_z = F_y \cdot d_x \end{cases} \quad (2)$$

式中, F_y 为水平加载载荷, d_z 为水平加载点到截面压心的距离的z轴投影, d_x 为水平加载点到截面压心的距离的x轴投影。

考虑重力影响的水平加载测试时,其中 $F_x = F_z = 0$, $G_y = G_z = 0$,故公式(1)可简化为

$$\begin{cases} M_x = -F_y \cdot d_z \\ M_y = G_x \cdot l_z \\ M_z = F_y \cdot d_x - G_x \cdot l_y \end{cases} \quad (3)$$

式中, G_x 为典型截面到叶尖部分质量重力载荷, l_z 为典型截面到叶尖部分质心到截面压心距离的z轴投影, l_y 为典型截面到叶尖部分质心到截面压心距离的y轴投影。

根据 M_x 、 M_y 和 M_z 的对叶片不同作用,在不考虑和考虑重力影响的比较中取 M_x 和 M_y 的合弯矩 M_{xy} 进行对比。

表1显示在最大摆向弯矩测试工况,考虑重力影响时叶片典型截面的弯矩较不考虑重力时的载荷增大了2.0%~9.1%,载荷方向偏11.31°~23.59°,截面扭矩在与叶根前13 m内减少了8.5%~26.8%,在距叶根13~32 m增大了0.7%~4.7%。

从以上数据对比可知,叶片自身重力使实际作用在叶片各典型截面的弯矩大于目标测试载荷,方向偏离目标测试方向,各截面的扭矩小于目标测试扭矩。

若不考虑重力的影响,就会使得叶片认证的位移测试数据与理论计算数据出现较大的偏差。

通过有限元对比考虑和不考虑重力影响进行分析,得出叶片4个测量截面在最大摆向弯矩测试工况

下的位移对比如表3所示,重力使y轴方向位移小于目标测试位移16.5%~18%,使x轴方向位移小于目标测试位移41.6%~78.5%,大于叶片认证误差5%的要求。

表1 不考虑和考虑重力的截面弯矩载荷对比

Tab.1 Load comparison of section bending moment by calculating and un-calculating the effect of gravity

距离叶根 L/m	不考虑重力		考虑重力		不考虑和考虑重力的 合弯矩夹角/(°)	考虑重力的 合弯矩超限/%	M _z 超限/%
	M _{xy} /kN·m	M _z /kN·m	M _{xy} /kN·m	M _z /kN·m			
0	4332.71	108.53	4727.23	79.40	23.59	9.1%	-26.8
4	3742.87	107.09	4026.19	82.94	21.63	7.6%	-22.6
8	3140.83	105.50	3338.03	88.27	19.80	6.3	-16.3
13	2387.21	102.89	2501.94	94.11	17.43	4.8	-8.5
16	2024.18	99.89	2105.76	100.56	16.01	4.0	0.7
20	1540.24	92.47	1591.14	95.52	14.54	3.3	3.3
25	934.90	72.77	965.99	75.69	14.58	3.3	4.0
28	677.66	58.51	691.62	61.24	11.53	2.1	4.7
32	340.10	32.93	346.83	34.18	11.31	2.0	3.8
36	-	-	-1.06	-	-	-	-

表2 加载工况加载方向的位移

Tab.2 Displacement in loading direction in case of horizontal loading condition

距离叶根 L/m	y轴方向位移/m			x轴方向位移/m		
	不考虑重力	考虑重力	重力的影响	不考虑重力	考虑重力	重力的影响
25	0.84	0.71	-15.7%	0.45	0.10	-78.5%
36	2.70	2.24	-17.2%	1.81	0.96	-46.8%
39	3.42	2.83	-17.4%	2.35	1.32	-43.7%
43.75	4.40	3.61	-17.9%	3.07	1.79	-41.6%

按以上步骤对其他三种工况进行分析可以得出相似的结论,故需要对叶片测试的理论计算数据进行修正,考虑重力影响;或对水平加载试验进行改进,消除重力的影响。前者由于增大叶片截面弯矩测试弯矩,同时增大了叶片破坏的风险。

3 结论

风电叶片水平加载方式的静载荷测试:

(1)测试过程中,如不考虑重力影响,叶片上某些截面实际施加的等效载荷(加载载荷和重力载荷的等效合力)可能远超出叶片设计的目标测试载荷造成测试过程中叶片失效,从而造成测试结果误判;

(2)为更加清晰地按照设计的目标测试载荷加载,应考虑其他方法消除或降低重力的影响。如:联合有限元分析,选取合适的叶片安装角度和加载力的方向,可显著降低叶片局部截面实际施加等效载荷的过载峰值,使得等效载荷的大小方向和目标测试载荷一致,然而由于较高的结构非线性,完全消除重力的影响很难实现,

但可以通过该方法有效地降低重力的影响。

本文分析结果对风电叶片的测试提供了实际参考依据,对提高风电叶片水平加载方式的静载荷测试的优化设计具有借鉴意义。

参考文献

[1] 许晓燕,颜鸿斌,李东,安明康,蔡建强. 风机叶片静载荷和模态测试技术[J]. 宇航材料工艺,2011,41(2):43-46

[2] Guideline for the certification of wind turbine [S]. Germanischer Lloyd Wind Energie GmbH. German, 2003

[3] JBT10194—2000 风电机组风能叶片[S]. 中华人民共和国机械行业标准,2000

[4] 王宝元,周发明,吴会民,等. 重力对火炮动力偶臂测量与计算影响研究[J]. 测试技术学报,2013,27(3):208-213

[5] 张晓明. 风力发电复合材料叶片的现状与未来[J]. 纤维复合材料,2006(2):60-63

[6] 祝贺. 风力发电技术发展现状及关键问题[J]. 华东电力,2009(2):0314-0316

(编辑 任涛)