

风机叶片静载荷和模态测试技术

许晓燕 颜鸿斌 李东 安明康 蔡建强

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 对近期国内外在风机叶片静载荷测试和模态测试方面的研究成果、测试标准和测试机构进行了评述。

关键词 风机叶片,静载荷测试,模态测试

Model Test and Static Test for Wind Turbine Blade

Xu Xiaoyan Yan Hongbin Li Dong An Mingkang Cai Jianqiang

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

Abstract Recent research findings and applications of static test and model test for wind turbine blade as well as test standards and test institutions at home and abroad are introduced in this paper.

Key words Wind turbine blade, Static test, Model test

0 引言

风机叶片是风力发电机的核心部件,是风机进行能量转换的重要组成部分。在自然环境中风机叶片承受着复杂的载荷,为确保叶片在风机实际使用中安全可靠,每种风机叶片在正式应用之前都要经过型式评估,包含:静载荷、模态、疲劳、雷击、无损以及叶片的一些基本属性检测(如质量分布,刚度分布等)。本文主要对近期国内外风机叶片的静载荷性能测试和模态测试方面的研究成果、测试标准和机构进行评述。

1 风机叶片静载荷和模态测试基本原理

风机叶片的结构刚度和强度对风机整体的结构承载能力和可靠性至关重要。静载荷性能测试的目的是验证叶片承受极限设计载荷(如50年一遇的狂风)的能力。风机叶片静载荷性能测试中的测试载荷是参照设计极限载荷确定的,通常要在预定的加载方向施加包含了足够安全余量的最大载荷,以测试其屈曲稳定性,并验证叶片的刚度和叶尖最大位移。静载荷性能测试可以使用多点或单点负载方法,并且负载可以在水平或垂直方向进行,加载可以使用液压激励,起重机,绞盘或其他加载装置。

风机叶片是弹性结构,作用其上的荷载具有交变

性和随机性,使得叶片动态特性较为复杂。风机叶片的自由动态响应可以分解为一系列离散的模式形式。这些模式参数包括:频率、阻尼、振型。在有意义的频率范围内,所有的模式构成了对叶片完全的动态描述。为了构建叶片的动力学模型,必须确定相应的模式参数。模式试验则是用来获得机械系统动态性质特征最常用的方法。目前叶片模式测试一般采用一阶手动激励,二阶脉冲锤驻点敲击的方式进行。

2 国外风机叶片静载荷和模态测试技术现状

国外风电产业起步较早,国外的各大检测机构对于叶片检测已经进行了很多实践和探索,积累了很多经验。早在20世纪90年代欧洲在该领域就开始制定标准测量方法和性能试验(SMT)^[1]。1996年,美国国家可再生能源实验室(NREL)的大型结构测试部门研制了测量叶片响应和跟踪叶片测试状态的数据采集系统(BSTRAIN),该系统可以自动搜集叶片静载荷和疲劳测试数据,自动检测叶片刚度,远程获得叶片测试状态,并分析处理数据,提高了试验精准性^[2]。1997年,W. D. Musial等人^[3]比较了两种叶片试验载荷,并且描述了加载方式:基于强度的方法和基于载荷的方法检验风机叶片的静载荷性能测试和疲劳测试。同年,欧洲主要叶片检测机构和NREL

收稿日期:2010-12-15

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

共同发起了一项名为“European Wind Turbine Testing Procedure Development”的项目^[4],各个叶片测试机构分别对同一批次的 Nedwind 25 叶片进行静力、模态和疲劳测试,以对各个机构所采用的不同测试方法进行比较。S. Larwood^[1]在报告中详细介绍了 NREL 对 Nedwind 25 叶片的几种测试方法及其结果。丹麦 Risø 实验室对模态测试中不同的锤击激励方式做了比较,并对一些可能的影响因素如试验台刚度、叶片自重等进行了相关研究^[5]。2002 年, G. C. Larsen 等人^[6]对风机叶片的振动模态进行了分析,提出随着风机叶片趋于大型化,叶片面临的柔度增加的问题,如摆振方向振动失稳,则会导致整个风轮的破坏。2006 年, E. R. Joergensen^[7]对某 34 m 叶片在挥舞方向加载直至破坏,并记录了整个加载过程中位移的变化情况。随后 F. M. Jensen 等^[8]人将试验结果和有限元分析进行了比较,还对该叶片的失效机理做了详细分析。M. Desmond^[9]利用一种新的有限元模型,对静载荷和疲劳载荷试验中叶片所受到的载荷和变形进行了分析。P. Malhotra^[10]则具体分析了大型风机叶片静载荷和疲劳载荷试验,并得到了大型的叶片更适合用双轴疲劳载荷测试的结论。2010 年, L. C. T. Overgaard^[11]等阐述了静载荷试验中当风机叶片承受挥舞方向的极限载荷的时候,叶片的破坏机理为叶片分层和屈曲。A. G. Dutton^[12]等采用声发射探测在静载荷和疲劳载荷试验中叶片的损伤情况。G. Wacker^[13]整理了风机叶片在认证时所必需的分析 and 文件资料,同时比较了不同标准(GL\NVN\IEC\DS)的区别。

由于国外在风电领域的研究起步较早,叶片测试的相关标准也已经形成,随着风电产业的不断发展,这些标准也得到了不断优化。近年来,国外对大型风机叶片静载荷测试和模态测试方面的研究主要集中在结构优化的试验验证、试验失效模式分析和测试手段的研究。

3 国内风机叶片静载荷和模态测试技术现状

近年来,随着国家对风电领域的大力支持,国内的风电事业取得长足进展。国内对风机叶片的静载荷和模态测试方面的研究也逐步深入。

风机叶片生产厂家在每个新型号的叶片装机之前必须完成叶片的型式评估,这为我们在叶片测试方面积累了宝贵的经验。同时,国内的一些研究机构也对风机叶片检测做了一些有益的尝试。如静力测试方面,汕头大学曹人靖等^[14],提出了一种研究水平轴风机风轮静载荷结构特性的测试方法,用单点加集中

载荷所得数据来综合评定受分布荷载作用的风轮叶片的强度及变形特性,用于检验风轮叶片结构设计的合理性,获得了在定常荷载作用下,叶片受力的危险截面。试验证明:通过以抗弯截面系数和定常荷载作用下的截面弯矩曲线的分布为判据进行叶片结构形状合理性分析是一种快速、实用的测试方法,可为研究风力机气动弹性稳定性和改进风轮叶片设计提供判据。

一项名为一种风电用大型叶片的静强度测试方法及测试系统的专利技术^[15],将单点加载后通过载荷分配梁转换成对叶片的多点加载,载荷分配梁与叶片加载夹具之间均通过吊索连接,吊索上安装有载荷传感器,叶片上安装有应变片和位移传感器,根据加载过程中分别采集到的受力、形变及位移数据信息,判断出叶片的静强度是否满足设计要求。在测试方法的研究方面,朱永凯^[16]结合声发射技术特点,研究了基于声发射传感器阵列的风机叶片结构健康监测方法。其中,PZT 压电陶瓷传感器阵列布设于受损率较高的叶片部位,对叶片按 20% 最大设计载荷的增量施加载荷,结合 Kaiser 效应和 Felicity 效应,分析采集到的声发射信号,统计声发射波击数,从而判断损伤发生的区域。该方法具有灵敏度高、定位准确和实时性好的特点,在风机叶片结构健康监测研究领域具有较大的意义。

风机叶片模态测试一般采用自由振动法或强迫振动法,通过对结构施加瞬态激励或连续的正弦激励,使结构产生自由或受迫振动,通过安装在某些确定位置的传感器记录相应振动信号,再对信号进行频率分析,如快速傅里叶变换等,进行模态参数识别,从而得到结构的动力特性参数如固有频率、阻尼及振型等^[17-18]。风机叶片的模态分析可用于检验模态参数,验证和改进解析模型,预测在假定激励作用下的响应;对于叶片的改变,如增加载荷、刚度等,预测动力学特性;或者是为得到所需的动态特性,预测出必要的结构设计上的改变^[19]。从另一个角度讲,风机叶片的失效在很多情况下都归因于共振应力所引起的疲劳。如果要延长叶片寿命,则必须降低叶片共振动应力^[20]。而模态数据无疑为降低叶片共振动应力提供了依据。

基于模态测试的重要性,和前面提及的基本试验方法,内蒙古工业大学的吴春梅等采用锤击法和正弦激励法对长度为 0.6 m、额定功率为 300 W 的叶片进行了模态实验^[21-22],测量出了 5 阶模态,比较了两种实验方式,并对两种不同质量的加速度传感器及其安

装位置对测试结果的影响进行了比较。叶枝全等^[23-24]采用汕头大学研制的 DAS 动态信号分析与故障诊断系统对 0.85 m 桨叶进行了实验研究,并与有限元分析结果进行了对比。沈阳工业大学的王琪等^[25]和天津工业大学的李声艳等^[26]分别对整机和风机叶片的模态进行了简单的测试。以上这些科研单位所测试的叶片均为不超过 1 m 的实心叶片,目前中国的主流叶片长度已达到 30-60 m,结构为由复合材料铺层辅以夹心材料构成的蒙皮和大梁组成的空心体。2005 年,毛火军^[27]针对 1.5 MW 级 38 m 长的风机叶片,进行了模态试验与数值模拟的研究。考虑到该型号叶片大展弦比、大质量、固有频率较低的结构特点,选择不测力法进行测量,选用合适的传感器,确定合理的测点布置方案进行试验研究,并对试验结果进行了分析。

可见,前期国内对风机叶片模态测试和静载荷性能测试的研究工作主要集中在小型叶片上。随着风机叶片逐渐趋于大型化,叶片无论是在尺寸还是在成本上都不可小觑,与之相应的叶片静载荷测试和模态测试工作也有了很大的变化,目前,国内每年测试的叶片不少,对叶片测试过程中的一些关键点的研究工作有待进一步深入。

4 风机叶片测试标准

国内外都有相关的检测标准对风机叶片的检测提供要求和参考,以满足质量认证的需要。目前国际上风机叶片检测标准主要有 IEC61400-23 Full-Scale Structural Testing of Wind Turbine Blades^[28]以及德国 GL 船级社的 Guideline for the Certification of Wind Turbine^[29]。

我国相关的风机叶片检测标准主要是 JBT10194-2000 风电机组风能叶片^[30],1999 年由中国航空工业总公司保定螺旋桨厂和上海玻璃钢研究所参考 IEC61400 标准共同制定^[27]。

5 风机叶片检测机构

目前,国外风电产业发展较快的国家或大的叶片制造厂商都建立了自己的叶片检测中心。其中仅丹麦就建有三处叶片检测中心,特别是 2005 年由挪威船级社、丹麦 Risø 国家实验室、FORCE 技术公司合作成立的 BLAEST,将最大检测叶片长度增加至 100 m,以满足未来几年内可能的需要。荷兰能源研究中心(ECN)通过与 Delft 大学以共建的形式成立了 WMC,承担着风电机组材料、部件和结构的研究开发工作,也承担基础研究课题(如:新材料的研究)及产业合作工作(如:部件认证测试)。此外还有:美国的

NREL,英国可再生能源中心(NaREC)。目前,美国正在筹建两个具有 70-100 m 叶片检测能力的试验中心^[31],其中,全球最大的风机叶片测试设备中心也将于 2011 年在马萨诸塞州首府波士顿正式启动。

一方面,我国风电产业迅速扩张,装机总量达到世界领先水平,装机叶片长度也从原来的 20 m,增加到了 60 m。另一方面,与国外相比,我国风电产业起步较晚,截止 2005 年,国内还没有完备的叶片检测机构^[32]。

现在国内各大叶片生产厂家也相继建立了自己的叶片测试机构,其中,中复连众全尺寸结构试验室能满足 1-5 MW 叶片的全尺寸静载荷、模态、疲劳测试的需要。采用计算机控制谐调加载技术,可实现载荷加载控制精度不低于 1%,应变测量误差不大于 1×10^{-4} ,挠度测量误差不大于 1 mm。2010 年底,亚洲首个第三方叶片全尺寸测试中心——SGS 亚太区风能技术中心,将正式投入运行,意味着中国风能服务的全面强化。

6 结语

目前,我国风电产业取得了跨越式发展,发展过程中凸显了一些弊端,其中叶片测试方面的研究薄弱。虽做了大量的叶片全尺寸静载荷和模态测试,但多是按照国外标准进行,国内目前对风机叶片测试方面深入的研究工作还不够深入,以下几个方向值得进一步深入研究。

(1)国内已有的研究工作,研究对象大多是比较小的叶片,大型叶片测试过程中遇到的一些新问题,有待进一步研究解决。

(2)如何通过风机叶片全尺寸静载荷和模态测试深入了解叶片的结构特性、优化试验设计及测试方法,是值得研究的一个方向。

(3)在测试的具体细节上,如传感器数量和施力点布置方案的影响,夹具的优化,扭矩测量和其对试验结果的影响等也需深入研究。

参考文献

- [1] Larwood S, Musial W, Freebury G, et al. Nedwind 25 blade testing at NREL for the European standards measurement and testing program [R]. DE2001-784655 NREL/TP-500-29103, 2001
- [2] Stensland T, Clark M, Musial W D. Application of BSTRAIN software for wind turbine blade testing[C]. NREL/TP-440-21507 CONF-960630-7 DE96-007950. Denver, CO (United States); Windpower 96: American Wind Energy Association (AWEA) Conference, 1996
- [3] Musial W D, Clark M E, Egging N, et al. Comparison of

strength and load-based methods for testing wind turbine blades [R]. NREL/CP-440-21979, CONF-970135-9. United States, 1996

[4] Bernard B, Jeroen V D, Don V D, et al. European wind turbine testing procedure development. SMT4-CT96-2116, Sub-task2: Final Report Blade testing methods [R]. ECN-C-00-055. European, 2000

[5] Henrik B P, Ole J D K. Applied modal analysis of wind turbine blades [R]. Risø-R-1388(EN). ISBN87-50-3169-2. Denmark: Risø National Laboratory, 2003.

[6] Larsen G C, Hansen M H, Baumgart A, et al. Modal analysis of wind turbine blades [R]. Risø-R-1181(EN). ISBN 87-55-2696-6. Denmark, 2002

[7] Joergensen E R, Borum K K, McGugan M, et al. Full scale testing of wind turbine blade to failure-flapwise loading [R]. Rio-R-1392(EN), ISBN 87-550-3184-6; ISBN 87-550-3185-4 (Internet) ISSN 0105-2840 Risø National Laboratory, Roskilde, 2004

[8] Jensen F M, Falzon B G, Ankensen J, et al. Structural testing and numerical simulation of a 34 m composite wind turbine blade [J]. Composite Structures, 2006, 76(1/2): 52-61

[9] Desmond M. The Development of a wind turbine blade finite element model to predict loads and deflections during static and fatigue structural testing [D]. Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, FL, 2009

[10] Malhotra P. Advanced blade testing methods for wind turbines [D]. University of Massachusetts Amherst, 2010

[11] Overgaard L C T, Lund E, Thomsen O T. Structural collapse of a wind turbine blade. Part A: Static test and equivalent single layered models [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing), 2010, 41(2): 257-270

[12] Dutton A G, Blanch M, Vionis P, et al. Acoustic emission monitoring from wind turbine blades undergoing static and fatigue testing [J]. British Journal of NDT Insight, 2000, 42(12), : 805-808

[13] Wacker G. Requirements for the certification of rotor blade [M]. Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, Hamburg, Germany

[14] 曹人靖, 刘道新. 水平轴风力机风轮静态结构特性实验研究 [J]. 太阳能学报, 2001, 22(4) 436-439

[15] 中国人民解放军国防科学技术大学, 株洲时代新材料科技股份有限公司. 风电用大型叶片的静强度测试方法及

其测试系统 [P], 中国, NO. 200910306642, 2009-10-30

[16] 朱永凯, 潘仁前, 陈盛票. 基于声发射传感器阵列的风机叶片结构健康监测方法 [J]. 无损检测, 2010(10): 753-756

[17] Ewins D J. Modal testing-theory/practice and application [M]. Denmark, Research Studies Press Ltd., 2000

[18] 黄小华, 李德源. 风力机叶片动力特性测试分析方法研究 [J]. 2007, 4(2): 92-94

[19] Ginsberg, Jerry H 著, 白化同, 李俊宝译. 机械与结构振动: 理论与应用 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005

[20] 李录平, 晋风华, 李杰, 等. 透平叶片几种减振结构的阻尼特性试验研究 [J]. 动力工程, 2004(6): 793-797

[21] 吴春梅, 田瑞, 刘博, 等. 小型水平轴风力机叶片的振动性能的研究 [J]. 能源技术, 2006(5): 205-207

[22] 吴春梅, 田瑞, 陈永艳. 风力机叶片模态实验影响因素的分析 [C] // 中国工程热物理学会流体机械学术会议, 绍兴, 2007

[23] 叶枝全, 马昊曼, 等. 水平轴风力机桨叶的实验模态分析 [J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 473-476

[24] 李德源, 叶枝全, 包能胜, 等. 风力机旋转风轮振动模态分析 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(1): 72-77

[25] 王琪, 杜伟宏, 孙淑霞. 水平轴风力发电机结构动态特性的测试与分析 [J]. 沈阳工业大学学报, 2001, 23(2): 107-109

[26] 李声艳, 徐玉秀, 孙晓梅. 风力发电机组风轮的动态特性分析 [J]. 天津工业大学学报, 2008, 25(6): 65-67

[27] 毛火军. 风电叶片全尺寸检测和结构分析 [D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2008

[28] IEC TS 61400-23. Wind turbine generator systems-part 23: Full-Scale Structural Testing of Rotor Blades, Edition 2001

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

[30] 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

[31] Cotrell J, Musial W, Hughes S. Necessity and requirements of a collaborative effort to develop a large wind turbine blade test facility in north america [R]. NREL/TP-500-38044. National Renewable Energy Laboratory, 2006

[32] 王仲颖, 胡润青, 秦海岩, 等. 中国风电产业化发展国家行动方案 [R]. 中国可再生能源规模化发展项目, 2005

(编辑 李洪泉)