

风力机风洞试验技术及研究进展*

肖京平^{1,2}, 陈立^{1,2}, 武杰^{1,2}, 段雪峰²

(1. 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;
2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 以 UAE phase VI 和 MEXICO(model experiment in controlled conditions) 项目以及中国空气动力研究与发展中心(China aerodynamics research and development center, CARDC) 相关的研究工作为背景, 概述了近年来风力机流场测量、压力分布测量、测力等风洞试验技术的进展, 介绍了在风洞的影响、叶素的等效远场自由来流条件确定、三维旋转效应、动态入流效应、流场结构和诱导效应方面的重要研究成果. 文章还简介了 CARDC 的大型风力机风洞试验研究工作及一些思路.

关键词: 风力机; 空气动力学; 风洞试验

中图分类号: TM614; O355 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.006

引言

实验研究可为物理数学模型构建提供依据, 为数值模拟方法提供验证, 是建立空气动力学描述体系、发展设计和评估技术的重要支撑. 风力机空气动力学研究面临着复杂的三维旋转流场和非正常空气动力学现象, 实验研究的重要性尤为突出.

风力机空气动力学实验分为现场(外场)实验和风洞试验. 现场实验一般在风力机实物的自然工作条件下采集分析自然风、风力机姿态、压力及载荷等参数. IEA Wind Annex XIV^[1], Annex XVIII^[2] 以及 DAN-AERO MW^[3] 是最有影响力的现场实验研究项目. 现场实验结果直接可用, 但外场测试环境的复杂性和不确定性导致数据处理的难度很大, 加之成本高、周期长、测试现场维护不易, 因此, 更多地利用测试条件可控的风洞试验进行风力机空气动力学研究. NREL(national renewable energy laboratory) 的 UAE(unsteady aerodynamics experiment) phase VI^[4] 在 NASA Ames 的 24.4 m×36.6 m 风洞(NFAC(national full-size aerodynamic comprehensive facility)) 中测量了直径 10 m 的二叶片风力机的载荷及叶片压力分布. MEXICO^[5] 项目在 DNW 的 LLF 风洞 9.5 m×9.5 m 开口试验段中对直径 4.5 m 的三叶片风力机开展了研究, 除载荷及压力测试外, 还获得了大量风力机周围流场的数据. 这两个项目都与国际上多个研究机构进行了合作, 以系统细致的研究工作著称. 本文主要以上述两个项目和 CARDC 开展的与风力机风

* 收稿日期: 2013-04-18; 修订日期: 2013-09-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2014CB046205)

作者简介: 肖京平(1963—), 男, 江西赣州人, 研究员(Tel: +86-816-2462034;

E-mail: xjpcardc@163.com);

陈立(1972—), 男, 四川绵阳人, 副研究员(通讯作者. Tel: +86-816-7067513;

E-mail: luckymice163@163.com).

洞试验相关的研究工作为背景,回顾了近年来主要的试验技术进展和部分重要的研究成果,并介绍了大型风力机风洞试验的尝试和湍流模拟能力较强的大气边界层装置。

1 风洞试验技术

1.1 流场测量

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术对流场无干扰,能够获取详细的区域流场数据并直观显示,因而在风力机流场测试中被广泛地使用^[6-14]。传统的接触式区域流场测量方法 (如热线或各类探针构成阵列或移测法) 已很少应用。

风力机流场研究的范围常远远超出设备视窗面积,因此需要应用数据拼接技术。CARD C 以典型的三角翼双涡流动结构为参照对比研究了多种插值算法的效果,最终认定在不严重影响插值计算效率的前提下, Kriging 算法 (Kriging algorithm) 一般具备最优的插值效果^[15]。图 1 是双相机同步测量数据拼接的尾迹流场。

风力机流场中的涡流动现象具有较强的非定常特性,即使在相同方位角状态下,涡心位置也会在一定范围内飘动。在数据的深加工中,例如提取叶尖涡核核轨迹以及涡量变化信息时,从平均结果中提取相关信息会产生较大的误差。在每一个原始数据中单独提取信息,然后再平均处理,可以大幅提高数据的可信度^[14-16]。

测量叶片绕流场时,由于光路被遮挡形成了照明盲区。利用在叶片遮挡区域反射补光的方法可同步获得完整的叶片截面绕流场信息^[15],见图 2。也可采用相位差 180° 的两幅图像进行拼接,但转捩位置误差相对较大。

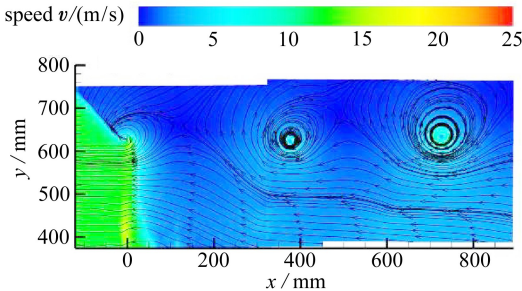


图 1 拼接的尾迹流场

Fig.1 Spliced wake flow field

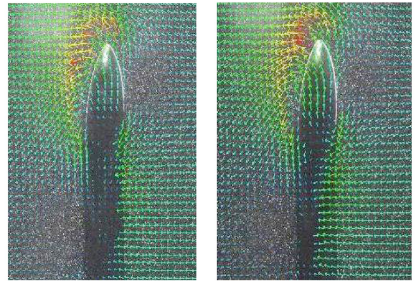


图 2 叶片截面绕流场补光前(左)后(右)

Fig.2 Airfoil section's circumferential flow field before (left) and after (right) artificial lighting

1.2 叶片压力分布测量

测量旋转叶片的表面压力分布对风力机空气动力学研究有重要的意义,但也是一个难点。为研究风力机流动的非定常特性,一般测量动态压力数据。

MEXICO 项目和 CARD C 开展的试验中,均使用了绝对压力传感器 (量程分别为 103 421.355 Pa 和 34 473.785 Pa)。其优点是传感器动态特性好、直接输出电信号而不需参考压和压力传递管路、数据修正相对简单;缺点是传感器量程大、精度相对较低、叶片上径向站位 50% 以内的测点数据的精准度都较差^[17]。

UAE phase VI 的试验中使用了差压式传感器。为了减少动态信号的传递失真必须将总的管路长度控制在 0.457 m 以下^[4, 18];为了给传感器提供稳定的、已知的参考压力,需要包含通气旋转接口的多级压力传递管路;数据需要进行复杂的流体静力学压力修正和离心力修正^[4]。

这种方法相对复杂但靠近叶根的压力更准确。

MEXICO 的试验研究表明不同叶片上对应位置的的压力测量结果一致性很好,见图 3。图中个别点的压力差异被认为是测点空间位置误差和测量系统的误差造成的,因此,可以将测点分别布置在不同的叶片上,避免测点布置在单个叶片上因空间不足使测点布置受限,以及叶片结构强度降低的问题。图 4 显示,精细的测压数据积分得到的风轮轴向力可替代天平直接测量的结果^[19]。

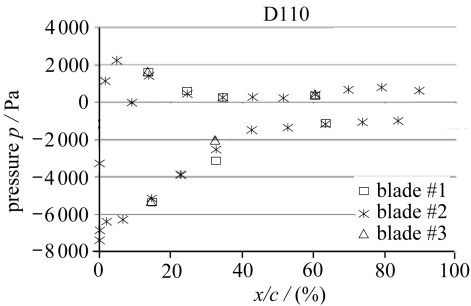


图 3 不同叶片径向 60% 站位处压力比较

Fig.3 Pressure comparison between different blades at the relative radial distance of 60%

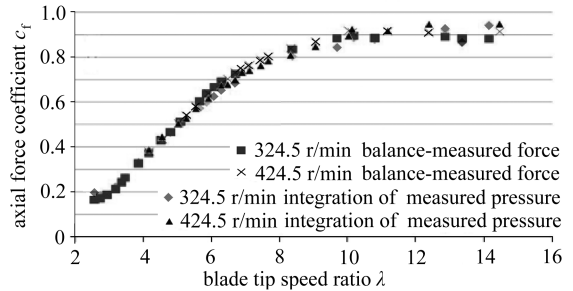


图 4 天平测得的风轮轴向力与测压积分结果

Fig.4 Balance-measured axial force and integration of measured pressure for a wind rotor

1.3 测力试验

UAE phase VI 试验(NFAC)及 MEXICO 试验(LLF(large low-speed facility)),都用塔柱根部的外式天平测力(图 5),解算风轮推力、扭矩等重要载荷。UAE phase VI 还在叶片根部和低速轴上用应变片组桥测量叶根载荷和风轮扭矩。MEXICO 试验(LLF)仅使用了外事天平,无法根据测力结果准确推算出功率特性^[20]。因此,直接测量风轮扭矩是很必要的。

CARDC 在 12 m×16 m 试验段建立的测试平台中,采用 5 个测力单元测量风力机载荷(图 6)。测力单元 4 和测力单元 5 是盒式应变天平。在传动轴上的弹性联轴节只传递扭矩,在轴向有一定自由度,保证了顺轴向推力测量的准确性。测力单元 3 可用联轴节之后的扭矩仪代替。试验时需对测力单元 4、5 采取遮蔽气流措施。该方法不需对塔柱干扰进行修正。

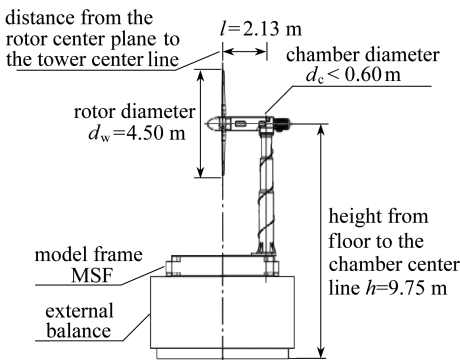


图 5 MEXICO 塔座天平测力方案

Fig.5 Balance measurement scheme on the MEXICO pedestal

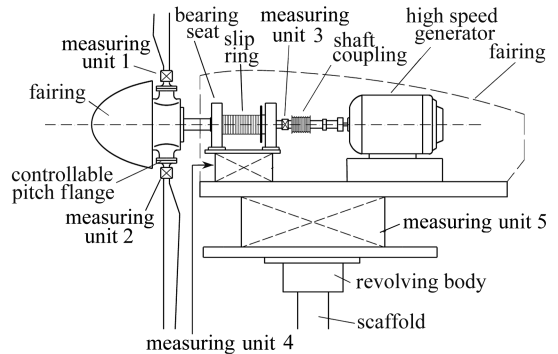


图 6 CARDC 的多天平测力方案

Fig.6 Multi-balance measurement scheme by CARDC

2 风洞影响的研究

风轮尺寸相对试验段口径过大时,会造成模型绕流模拟失真,难以进行可靠的数据修正。一些研究工作由于忽视了风洞的影响,以致除一些趋势性的结论外,定量结果无法使用。

2.1 闭口试验段的影响

闭口试验段的影响体现在因洞壁对风轮绕流和尾迹流场的约束所产生的洞壁干扰现象。阻塞度(风轮扫掠面积与试验段截面积的比值)为2%时,就存在洞壁干扰^[21]。风轮转速较高时阻塞越明显,洞壁干扰量越大。闭口试验段对试验结果的影响量较大,阻塞度为10%时可使 C_p 偏大25%^[22]。Glauert^[23]以及Maskell^[24], ε -max方法可用于洞壁干扰修正,但修正误差较大^[25]。壁压信息法^[26]不建立试验模型及其尾流的纯理论模拟,而是根据试验时的洞壁静压分布求解适当位置虚拟面源与线涡的强度分布,使其在洞壁产生的诱导速度与试验模型产生的相同,并用这些等效面源与线涡的洞壁干扰速度分布来逼近试验模型的洞壁干扰速度分布。CARDC的江桂清在壁压信息矩阵法基础上得到用于风力机风洞试验的数据修正方法,经过对比研究确认其效果较好^[27-28]。壁压信息法目前仍是闭口试验段最常用的修正方法。

由于闭口试验段影响的修正量相对较大,壁压数据的准确性和数据处理方法的精度非常重要。近年来CARDC的陈洪等采用涡格法进行奇点镜像模拟,将奇点系布置在洞壁以外的位置(传统方法布置在洞壁上),利用洞壁不穿透条件迭代计算奇点系的强度分布,避免了奇点附近的诱导速度处理,提高了修正精度。结合数值风洞技术研究闭口试验段的影响和修正方法是一个新的方向。

2.2 开口试验段的影响

相对闭口试验段,开口试验段可使用更大尺寸的模型^[29]。MEXICO风洞(LLF, KARI)试验的阻塞度约17%,CARDC在 $\phi 3.2$ 风洞试验中的阻塞度约15%^[14];而UAE phase VI和CARDC在闭口试验段中的阻塞度分别约为9%和10%。

MEXICO项目中详细研究了开口试验段的影响。根据一维轴向动量理论可知开口试验段的影响使风力机轴向力偏大^[30],但是该影响量有限^[31],Shen等计算得到LLF风洞中最大的影响量约5%^[32]。Rozendal的试验结果^[33]和Réthoré等的研究^[34-35]表明收集口后的环缝使压力回升,使风洞的影响明显减小。上述研究主要是针对LLF风洞开展的,不同风洞的影响规律应是一致的,量值由风洞具体参数确定。

3 叶素的等效远场自由来流条件确定

确定三维旋转条件下叶素的等效远场自由来流条件,即确定叶素攻角和总静压,是为了与二维翼型气动特性进行对比分析,也是大部分风力机空气动力学研究工作的前提。

3.1 攻角确定

由图7可见,二维翼型前缘附近流线弯曲,前缘伸出的探针测得的当地入流角和实际攻角有一个差值,该差值可视为由翼型附着涡引起的当地诱导偏角。同理,可用叶素前缘探针测得的当地入流角减去沿叶片分布的附着涡共同作用而产生的诱导偏角,以得到等效远场攻角。在三维效应不明显时,一般将叶素驻点位置或压力分布与二维翼型试验结果比较,然后选择结果相近的二维试验条件并由此确定其对应的诱导偏角。对于三维效应较明显的工况,一直缺乏有效的攻角确定方法,影响了试验数据的合理使用。

近年来发展了3种确定攻角的方法^[17]。叶素动量理论逆推法^[36-37](inverse BEM method)根

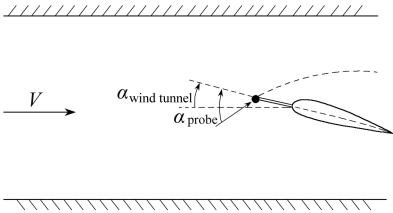


图 7 诱导偏角

Fig.7 Induction declination

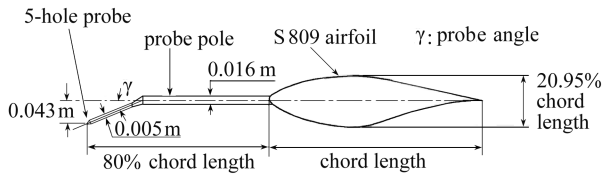


图 8 UAE phase VI 的 5 孔探针

Fig.8 5-hde probe for UAE phase VI

据叶素压力分布积分得到法向力和切向力,然后利用轴向和切向叶素动量理论迭代计算诱导因子,收敛时得到速度三角形.自由尾迹逆推法(inverse free wake method)来源于反自由尾迹模型(inverse free wake model)^[38],积分得到叶素气动力后按照名义初始攻角(由风洞来流或自然风与线速度构成的速度三角形确定)分解得到升力,进而根据 Kutta-Joukowski 定理确定附着涡环量,附着涡拖曳至尾流后计算得到尾迹涡诱导产生的攻角.将该攻角代入升力分解步骤迭代计算,收敛后可得到攻角.第三种方法称直接法^[39-40],其分析基础是叶素压力分布数据,以及前缘区域叶素平面内系列采样点的 PIV 速度数据.通过迭代计算附着涡环量对采样点的 PIV 速度矢量的影响,收敛后可得到攻角.

3.2 无量纲化

无量纲化需要确定等效远场动压和静压.静压无法直接测量,因此一般采用测量总压和动压的方法.通常以前缘探针测量的最大压力或叶素测压结果的最大值作为总压.为了尽可能获得准确的总压值,采用加密叶片截面测点的方法,或按一定角度安装探针使探针尽量对准气流(图 8).在 UAE phase VI 中采用了基于球坐标系的算法来确定探针总压测量值^[41].

动压可使用上述确定攻角的方法结合当地速度测量结果计算,也可根据 Shipley 等^[42]的方法确定,最简化、误差最大的方法是根据风洞来流速度和旋转线速度合成.关于这些方法的效果还需进一步研究.

4 三维旋转效应试验研究

风力机运行时,由于三维旋转效应的影响,风轮载荷和功率输出通常高于根据静态翼型数据推算的结果,这是发电机烧毁的重要原因.目前,三维旋转效应的机理尚未被完全认识,但普遍认为其本质是在科氏力、离心力及其他因素的共同作用下,翼型气动特性出现的失速延迟现象.

上世纪九十年代 CARDC 与 FFA 合作在 12 m×16 m 风洞里成功地测量了旋转叶片表面 8 个截面、232 个测点的压力分布^[43],极大促进了三维效应的研究.为了突破风洞对模型尺寸的限制,IEA Wind Annex XIV^[1], Annex XVIII^[2]以及 DAN-AERO MW^[3]测量了全尺寸机组叶片的截面压力分布,但报告中承认测试环境的复杂性严重影响了结果的不确定度.

近年来在两期风洞试验中对三维效应进行了精细的研究.UAE phase VI(NFAC)试验中,旋转叶片径向站位 30%位置处的最大升力系数为 2.1,失速攻角 26.4°,而 DTU 二维翼型试验得到最大升力系数为 1.05,失速攻角 15°,可见三维旋转效应使最大升力系数显著增加、失速大大延迟^[44].Schreck 等分析了 UAE phase VI(NFAC)和 MEXICO(LLF)试验中驻浆及旋转状态下的压力积分数据,认为三维旋转效应在整个叶片上都存在,而且越靠近根部越明显^[45],见图 9.

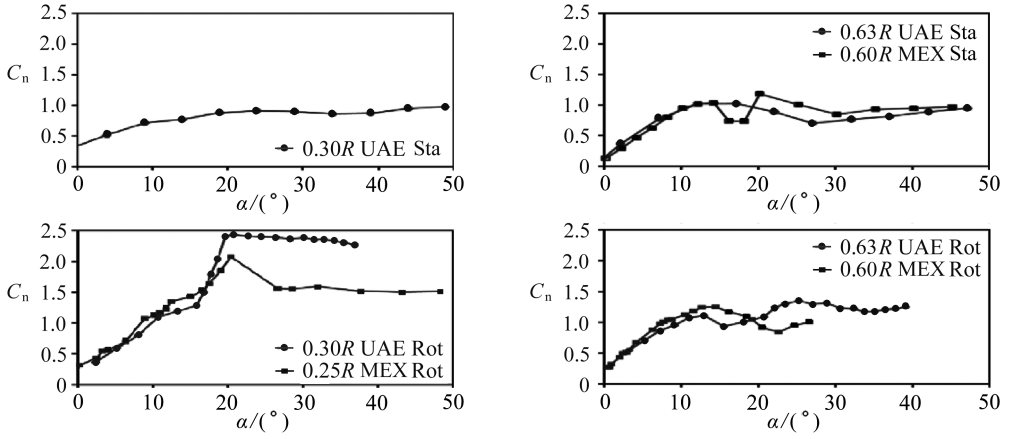


图9 不同径向站位截面上的三维旋转效应

Fig.9 Three dimensional effects on the sections at different radial stations

为了更好地将二维翼型数据用于设计和评估,需要进行三维旋转修正.迄今,已经发展出了多种失速延迟模型,但是普遍存在计算载荷偏大的问题.目前三维旋转效应仍然是风力机空气动力学研究的热点,仍然需要精细的风洞试验数据支撑.

5 动态入流效应试验研究

桨距角、转速、风速发生突然的变化,但是尾迹以及相应的风轮平面处诱导速度的变化有一定延迟,这种效应被称为“动态入流”.动态入流常导致风力机载荷和功率的过度响应.早期欧洲的 Dynamic Inflow 项目中,Snel 和 Schepers 等开展了工程建模研究,发展了几种模型并应用到计算程序中^[46-47],如 ECN model 的研究成果在 PHATAS 程序中有所体现.DTU 在外场测试了 Tjæreborg 风力机(直径 60 m, 2 MW)的叶根挥舞力矩和风轮轴扭矩对于快速变距的响应^[48],但测量的干扰因素较多,更重要的是并未研究动态入流效应与径向位置的相关性.

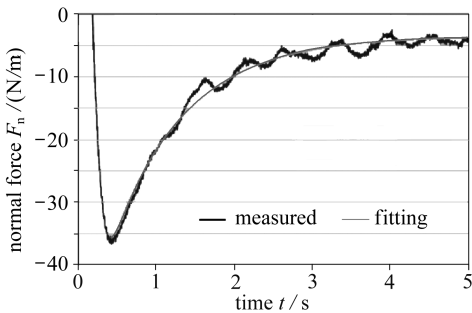


图10 桨距角变化引起的动态入流效应

Fig.10 Dynamic inflow effect by change of pitch angle

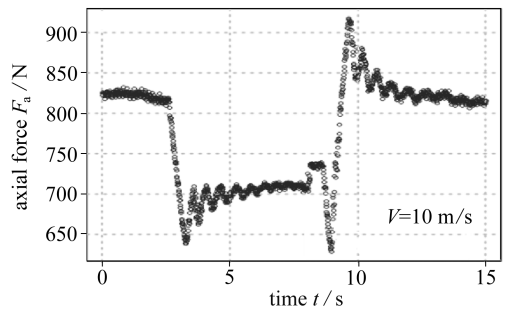


图11 转速变化引起的动态入流效应

Fig.11 Dynamic inflow effect by rev change

在风洞中进行动态入流试验研究的好处是显而易见的:试验段气流远比自然风均匀、稳定、湍流度小,尺寸较小的风力机结构响应也相对较小,试验受到的干扰明显减轻了.UAE phase VI 试验(NFAC)测量了5个径向位置的压力分布和轴向力,详细研究了不同风速下桨距阶跃变化的影响.为了尽可能消除结构动态响应、塔影效应、风洞条件波动等的干扰,试验数据处理时采用了若干时间序列平均的方法.试验证明桨距角变化引起了明显的动态入流效应^[49](图10).试验测得的动态入流效应与 AWSM 预测吻合较好(桨距上升步进过程中的响应过度

和时间常数),但是桨距下降步进过程中时间常数几乎不沿径向减小,与 ECN model 的理论分析相反,这种现象需要进一步研究。

Pascal 研究了转速变化导致的动态入流效应^[50]。试验中,风力机桨距角不变,风速为 10 m/s、15 m/s、18 m/s 和 22 m/s 时,转速在 424.5 r/min 和 324.5 r/min 之间来回跃变。试验表明:动态入流对于诱导速度的影响随着风速降低而增强,载荷变化随径向位置向叶尖变化而加剧。图 11 给出了 10 m/s 风速数据下塔柱根部天平测得的轴向力(未扣除塔架阻力),可以看出明显的动态入流效应。

6 流场结构和诱导效应试验研究

风力机尾流中的涡系产生复杂的诱导速度场,对非定常气动特性、气动噪声、气动干扰等有重要的影响。准确测量涡运动规律以及涡强、涡龄等参数,能为风力机气动模型和涡尾迹方法研究提供重要的基础数据和验证依据。Ebert 等^[51-52], Vermeer 等^[53], Mast 等^[54], 朱春建等^[55]在风洞中用热线进行了精确定量的研究,但受限于热线的点测量方式,得到的数据较少。Smith 等^[56], Whale 等^[6-8], Grant 等^[57-59], Maeda 等^[60], Massouh 等^[61], 高志鹰等^[13]利用 PIV 技术测量了风力机的流场并进行了简要的分析。Dobrev 等^[12]详细测量了一个简化风力机模型的流场结构,基于试验数据深入分析了叶尖涡特性。

近年来风力机的 CFD 方法和涡尾迹方法迅速发展,要求风力机模型更具代表性,试验数据更加精细。CARDIC 以 NREL UAE phase VI 风力机叶片 1/8 缩比模型为实验对象,在 $\phi 3.2$ m 开口风洞中针对尾流开展大视场(单个观测区域达到 570 mm \times 380 mm)PIV 测量。试验获得了叶尖涡、叶片截面绕流、尾迹横截面流场的数据,定量分析了叶尖涡的产生、发展和耗散过程^[14],测量了涡的拖曳和卷起(见图 12)过程,证实了 Miller 的分析^[62]。试验结果表明,可以在靠近风轮很近的距离内考虑从叶片不同叶素后缘脱出的涡线的诱导作用,并将尾涡系简化成一条叶尖涡,以减小涡尾迹方法的计算量。

MEXICO 项目进行了迄今最为详细复杂的流场试验研究, Schepers 等^[63-66]采用三维 PIV 技术测量了风轮平面前后流场以及叶尖涡的结构和轨迹,还同步测量了叶片气动载荷(测压)。研究表明,环量强度(表面压力测量积分)与叶尖涡强度(PIV 测量积分)有很好的相关性。测量结果证实了动量理论和圆柱涡方法的结论:下游远场处的速度亏损是风轮平面处速度亏损的两倍,速度亏损与径向位置无关。试验测得风轮平面处的平均速度与动量理论一致,然而,只有将动量理论中的轴向力系数设置为 0.89 时,动量理论预测的速度亏损才与测量相吻合(试验得到的轴向力系数只有 0.72),见图 13。试验还研究了风轮平面流动的非均匀性,验证了 Prandtl 叶尖损失理论。

7 大型风力机风洞模拟试验

大型风力机风洞试验面临的第一个问题就是模型与实物的雷诺数(Reynolds number)通常有数量级的差别。记风力机在来流风速为 v 时转速为 ω ,模型缩尺为 $1/k$,为同时满足运动和动力相似,风洞风速应为 kv ,模型转速应为 $k^2\omega$,此时叶尖速度为实物的 k 倍。考虑风洞的影响,即使在最大的风洞中试验,对于大型风力机而言 k 一般也超过 10,多数风洞中可超过 20,因此不可能同时满足所有相似准则。一般优先满足几何相似、运动相似(叶尖速比)及不可压条件(马赫数(Mach number)),而尽量提高风洞风速并相应调整转速以减小雷诺数效应的影响。CARDIC 开展了大型风力机风洞模拟试验研究^[22]。原型叶片最大弦长 3.198 m,风轮直径 83 m,

额定旋转速度 17.23 r/min,设计额定风速 10.4 m/s,模型缩尺为 1/16.与计算结果比较,实验结果显示出明显的雷诺数效应^[22,67](见图 14).

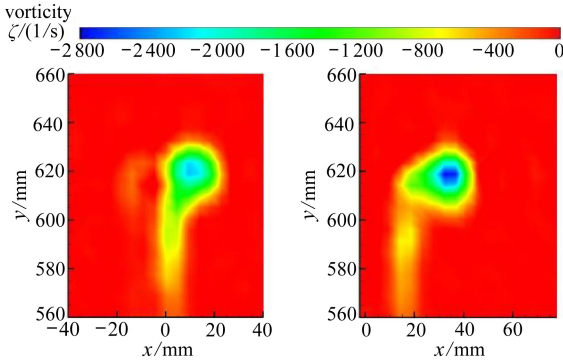


图 12 叶尖涡拖曳和卷起时的涡量图

Fig.12 Blade tip trailing and coiling vorticity contour

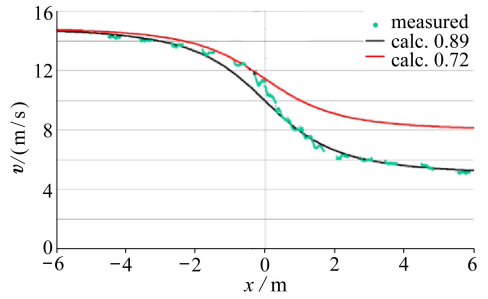


图 13 速度亏损试验值与动量理论计算值比较

Fig.13 Comparison of speed loss between exper. values and calculated values by momentum theory

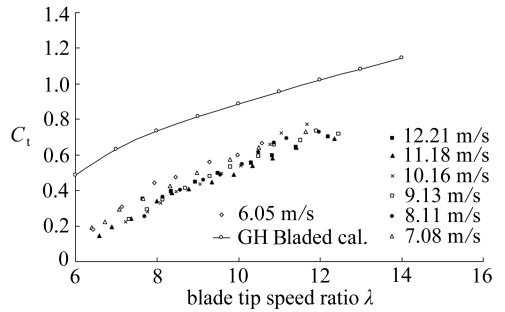
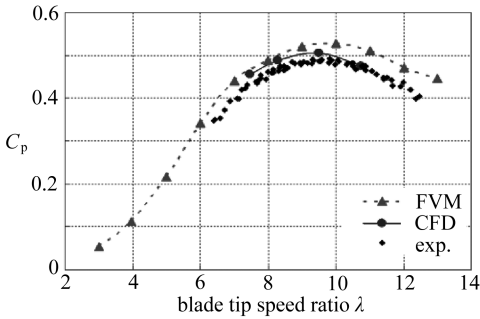


图 14 C_p 和 C_t 试验结果与计算值的比较

Fig.14 Comparison of C_p & C_t between exper. values and calculated values

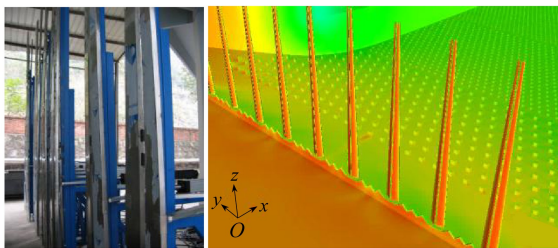


图 15 大气边界层主动模拟装置

Fig.15 Active simulating system for the atmosphere boundary layer



图 16 海上风力机模型综合试验

Fig.16 Synthetic model experiment on the floating wind turbine

除了共有的空气动力学现象外,大型风力机具有大大不同于小型风力机的气动特性.首先,大气边界层的风剪切效应不可忽略.大型风力机叶片在不同方位角对应的平均风速变化很明显,叶片转到最高处和最低处的风能量可相差 50%.其次,大型风力机叶片尺寸与大气边界层的湍流大涡结构尺度相当,受到湍流脉动的影响很大,叶片非定常气动载荷的变化更显著.常规的大气边界层风洞模拟方法是在长试验段入口布置静止的尖劈和粗糙元,风速梯度模拟很好,但对低频湍流的模拟不足,湍流强度衰减过快,湍流积分尺度也只有实际的 1/500~

1/300, CARDC 研制了一套通过机械能注入增强紊流能量的大气边界层主动模拟装置(图 15), 用电动机带动尖劈及其上的挡板做周期性运动向气流补充湍流动能, 特别是低频的湍流能量, 产生较大和较稳定的湍流强度、积分尺度, 湍流频率和尺度可调节。该装置附近的最大湍流速度可达 20%, 湍流积分尺度约 800 mm, 边界层模拟高度 5 000 mm, 适合直径 2 m 以下的大型风力机缩尺模型开展风剪切和整体动态特性研究。

海上风力机受到复杂大气边界层、非线性波浪和强湍流边界层海流等的综合作用, 常处于大幅度运动中, 而且还存在海浪和海流对风力机基础的影响。因此要解决风力机的安全平稳运行问题, 必须综合考虑风、浪、海流与风力机结构系统的耦合作用, 深刻揭示其耦合的力学机理。目前, 欧美一些研究机构利用水池和波浪槽等设备模拟海浪、洋流等, 以风扇提供风源, 开展气-液-固综合实验研究(图 16)。但这类试验系统的流场条件可控性、流场覆盖范围等尚不能完全满足研究需要。CARDC 计划将风力机模型安装在 6 自由度的底座上面, 通过底座的运动控制模拟海浪、洋流等的作用, 并在大型风洞中测试这种运动对于风力机气动特性的影响。这种方式虽然不能模拟出耦合的效果, 但在研究气动力和水动力的单向作用方面更具优势。

8 结 语

UAE phase VI 和 MEXICO 项目以及 CARDC 相关的风力机风洞试验研究工作, 分别代表着当今国际和国内的先进水平。本文以其为主要背景选择性地介绍了近年来风洞试验技术的进展以及一些重要的研究成果。今后, 风力机流动机理研究、计算方法和工程模型验证及优化、气动性能评估对于精细化的风洞试验仍有迫切的需求。为了适应风力机空气动力学研究的需要, 风洞试验时宜在典型工况下综合运用多种测量手段, 同步动态采集尽量多的物理参数, 多角度地定量描述风力机的特殊流动现象, 便于从各个方面综合分析; 应深入研究精细的风洞影响的修正技术, 尤其是闭口试验段的壁压信息法需要改进或发展新的修正方法; 应针对同一大型风力机, 综合运用理论分析和数值模拟、大缩尺模型风洞试验、实物外场实验的手段开展相关性研究, 探索风洞试验数据应用于实物风力机性能评估的方法。此外, 随着海上风电规模开发和风力机超大型化发展, 应更加重视大型风力机综合试验技术研究以及气动弹性风洞试验技术研究。

参考文献(References):

- [1] Schepers J G, Brand A, Bruining A, Graham J, Hand M, Infield D, Madsen H, Paynter J, Simms D. Final report of IEA annex XIV: field rotor aerodynamics[R]. ECN-C-97-027, ECN solar energy, 1997.
- [2] Schepers J G, Brand A J, Bruining A, Van Rooij R, Graham J M R, Paynter R J H, Hand M M, Simms D A, Infield D G, Madsen H A, Maeda T, Shimizu Y, Stefanatos N. Final report of IEA annex XVIII: enhanced field rotor aerodynamics database[R]. ECN-C-02-016, ECN wind energy, 2002.
- [3] Aagaard Madsen H, Bak C, Schmidt Paulsen U, Gaunaa M, Fuglsang P, Romblad J, Olesen N A, Enevoldsen P, Laursen J, Jensen L. The DAN-AERO MW experiments: final report[R]. Risø-R-1726(EN), 2010.

- [4] Hand M M, Simms D A, Fingersh L J, Jager D W, Cotrell J R. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns[R]. NREL/TP-500-29955. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [5] Schepers J G, Snel H. Model experiments in controlled conditions[R]. ECN-E-07-042, ECN wind energy, 2007.
- [6] Whale J, Anderson C G. An experimental investigation of wind turbine wakes using particle image velocimetry[C]//*Proc 1993 European Community Wind Energy Conf.* TravemuKnde, Germany, 1993: 457-460.
- [7] Whale J, Helmis C G, Papadopoulos K H, Anderson C G, Skyner D J. A study of the wake structure of a wind turbine comparing measurements from laboratory and full-scale experiments[J]. *Solar Energy Engineering*, 1996, **56**(6): 621-633.
- [8] Whale J, Anderson C G, Bareiss R, Wagner S. An experimental and numerical study of the vortex structure in the wake of a wind turbine[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, **84**(1): 1-21.
- [9] Fujisawa N, Shibuya S. Observation of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, **89**(2): 201-214.
- [10] Hirahara H, Hossain M Z, Kawahashi M, Nonomura Y. Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes[J]. *Renewable Energy*, 2005, **30**(8): 1279-1297.
- [11] 胡丹梅, 田杰, 杜朝辉. 水平轴风力机尾迹流场 PIV 实验研究[J]. 太阳能学报, 2007, **28**(2): 200-206. (HU Dan-mei, TIAN Jie, DU Chao-hui. PIV experimental study on the wake flow of horizontal-axis wind turbine model[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, **28**(2): 200-206. (in Chinese))
- [12] Dobrev I, Maalouf B, Troldborg N, Massouh F. Investigation of the wind turbine vortex structure[C]//*14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbon, Portugal, 2008.
- [13] 高志鹰, 汪建文, 东雪青, 韩晓亮, 白杨, 由志刚. 水平轴风力机叶尖涡流动的 PIV 测试[J]. 工程热物理学报, 2010, **31**(3): 414-418. (GAO Zhi-ying, WANG Jian-wen, DONG Xue-qing, HAN Xiao-liang, BAI Yang, YOU Zhi-gang. PIV experiment on tip vortex flow of horizontal axis wind turbine[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, **31**(3): 414-418. (in Chinese))
- [14] 肖京平, 武杰, 陈立, 史喆羽. 风力机叶尖涡尾迹结构 PIV 测量研究[J]. 应用数学和力学, 2011, **32**(6): 683-692. (XIAO Jing-ping, WU Jie, CHEN Li, SHI Zhe-yu. PIV measurements of tip vortex wake structure of a wind turbine[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, **32**(6): 683-692. (in Chinese))
- [15] 肖京平, 陈立, 武杰, 李晓华. 风力机风洞试验平台建设[C]//第八届全国风能应用技术年会论文集. 江苏, 无锡, 2011. (XIAO Jing-ping, CHEN Li, WU Jie, LI Xiao-hua. Construction of wind turbine experiment platform in wind tunnel[C]//*Proceedings of the 8th National Wind Energy Application Technology*. Wuxi, Jiangsu, 2011. (in Chinese))
- [16] Raffel M, Willert C, Wereley S, Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2007.

- [17] Schepers J G, Boorsma K, Cho T, Gomez-Irardi S, Schaffarczyk P, Jeromin A, Shen W Z, Lutz T, Meister K, Stoevesandt B, Schreck S, Micallef D, Pereira R, Sant T, Madsen H, Sorensen N. Final report of IEA task 29, mexnext (phase 1): analysis of MEXICO wind tunnel measurements[R]. ECNE-12-004, ECN wind energy, 2012.
- [18] Butterfield C P, Musial W P, Simms D A. Combined experiment phase I: final report[R]. NREL/TP-257-4655. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 1992.
- [19] Schepers J G. Engineering models in wind energy aerodynamics: development, implementation and analysis using dedicated aerodynamic measurements[D]. PhD Thesis. Delft: Technische Universiteit Delft, 2012.
- [20] Schepers J G, Boorsma K, Bon A. Results from mexnext: analysis of detailed aerodynamic measurements on a 4.5 m diameter rotor placed in the large German Dutch wind tunnel DNW [C]//*Proceedings of European Wind Energy Conference*. EWEC. Brussels, 2011.
- [21] 贺德馨, 陈坤, 张亮亮, 李明水, 黄汉杰, 陈忻, 周渝平, 朱国林, 李树民, 王开春. 风工程和工业空气动力学[M]. 国防工业出版社, 2006. (HE De-xin, CHEN Kun, ZHANG Liang-liang, LI Ming-shui, HUANG Han-jie, CHEN Xin, ZHOU Yu-ping, ZHU Guo-lin, LI Shu-ming, WANG Kai-chun. *Wind Energy and Industrial Aerodynamics*[M]. National Defence Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [22] 肖京平, 陈立, 许波峰, 武杰. 1.5 MW 风力机气动性能研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 131-136. (XIAO Jing-ping, CHEN Li, XU Bo-feng, WU Jie. Investigation on aerodynamic performance of a 1.5 MW wind turbine[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(4): 131-136. (in Chinese))
- [23] Glauert H. *The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory*[M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1983.
- [24] Maskell E C. A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel[R]. Aeronautical Research Council ARCR & M3400, 1965.
- [25] Schreck S, Robinson M. Dynamic stall and rotational augmentation in recent wind turbine aerodynamics experiments[C]//*32nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*. AIAA 2002-2967, St Louis, Missouri, 2002.
- [26] Hackett J E, Wilsden D J, Stevens W A. A review of the wall pressure signature and other tunnel constraint correction methods for high angle-of-attack tests[R]. AGARD wind tunnel corrections for high angle of attack models, 1981.
- [27] 江桂清. 低速实壁风洞壁压信息洞壁干扰修正法[J]. 空气动力学学报, 1988, 6(2): 64-72. (JIANG Gui-qing. The wall pressure signature matrix method for solid wall interference correction of low speed wind tunnel[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1988, 6(2): 64-72. (in Chinese))
- [28] 江桂清. 低速壁压信息洞壁干扰修正方法两个重要的新改进[J]. 空气动力学学报, 1992, 10(4): 435-443. (JIANG Gui-qing. Two important improvements upon wall pressure signature correction method of low-speed wind tunnel[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1992, 10(4): 435-443. (in Chinese))
- [29] Barlow J B, Rae W H, Pope A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*[M]. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc, 1999.

- [30] Snel H. 1-Dimensional analysis of flow around turbine including collector effects[R]. Discussion document for MEXICO project group. Energy Research Center of the Netherlands, ECN, 2002.
- [31] Voutsinas S. MEXICO WP2: Navier Stokes and Euler simulations to determine the maximum rotor size[R]. MEXICO-DOC-WP2-01-01. National Technical University of Athens, 2003.
- [32] Shen W Z, Zhu W J, Sørensen J N. Validation of the actuator line/Navier Stokes technique using MEXICO measurements[C]//*Proceedings of EAWC Conference 'The Science of Making Torque From the Wind'*. Crete, 2010.
- [33] Rozendal D. Flow field measurements on a small scale wind turbine model in the DNW PLST wind tunnel[R]. NLR-CR-2003-484. National Aerospace Laboratory NLR, 2003.
- [34] Réthoré P E, Sørensen N N, Zahle F, Bechmann A, Madsen H A. MEXICO wind tunnel and wind turbine modelled in CFD[C]//*AIAA-2011-3373, AIAA Conference*. Honolulu, Hawaii, USA, 2011.
- [35] Réthoré P E, Sørensen N N, Zahle F, Bechmann A, Madsen H A. CFD model of the MEXICO wind tunnel[C]//*EWEA Annual Event Held at Brussels*, 2011.
- [36] Hansen M O L, Johansen J. Tip studies using CFD and computation with tip loss models[J]. *Wind Energy*, 2004, **7**(4): 343-356.
- [37] Guntur S K, Bak C, Sørensen N N. Analysis of 3D stall models for wind turbine blades using data from the MEXICO experiment[C]//*13th International Conference on Wind Engineering*. ICWE, Amsterdam, 2011.
- [38] Sant T, Van Kuik G, Van Bussel G J W. Estimating the angle of attack from blade pressure measurements on the NREL phase VI rotor using a free wake vortex model: axial conditions [J]. *Wind Energy*, 2006, **9**(6): 549-577.
- [39] Shen W Z, Hansen M O L, Sørensen J N. Determination of the angle of attack on rotor blades [J]. *Wind Energy*, 2009, **12**(1): 91-98.
- [40] Yang H, Shen W Z, Sørensen J N, Zhu W J. Extraction of airfoil data using PIV and pressure measurements[J]. *Wind Energy*, 2011, **14**(4): 539-556.
- [41] Freeman J B, Robinson M C. Algorithm using spherical coordinates to calculate dynamic pressure from 5-hole pressure probe data[C]//*Proceedings of 1998 ASME Wind Energy Symposium*. Reno, NV. New York: American Institute for Aeronautics and Astronautics, 1998.
- [42] Shipley D E, Miller M S, Robinson M C, Luttges M W, Simms D A. Techniques for the determination of local dynamic pressure and angle-of-attack on a horizontal axis wind turbine[R]. NREL/TP-442-7393. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [43] Dexin H, Thor S-E. The execution of wind energy projects 1986-1992[R]. FFA TN 1993-19. Bromma: Aeronautical Research Institute of Sweden, Jun, 1993.
- [44] Breton S O, Coton F N, Moe G. A study on rotational effects and different stall delay models using a prescribed wake vortex and NREL phase VI experiment data[J]. *Wind Energy*, 2008, **11**(5): 459-482.
- [45] Schreck S, Sant T, Micallef D. Rotational augmentation disparities in the MEXICO and UAE phase VI experiments[C]//*Conference Paper NREL/CP-500-47759*, 2010.
- [46] Snel H, Schepers J G. Joint investigation of dynamic inflow effects and implementation of an

- engineering method[R]. ECN-C-94-107, Energy Research Centre of the Netherlands, 1995.
- [47] Snel H, Houwink R, Bosschers J. Sectional prediction of lift coefficients on rotating wind turbine blades in stall[R]. ECN/C: Vol **93**, Issue 52. Netherlands Energy Research Foundation, 1993.
- [48] Øye S. Tjæreborg wind turbine (esbjerg) first dynamic inflow measurements[R]. AFM notat, VK-187, Lyngby: Technical University of Denmark, 1991.
- [49] Schepers J G. IEA annex XX: dynamic inflow effects at fast pitching steps on a wind turbine placed in the NASA-Ames wind tunnel[R]. ECN-E-07-085, ECN wind energy, 2007.
- [50] Pascal L. Analysis of MEXICO measurements[R]. ECN-Memo-09-010, Energy Research Center of the Netherlands, ECN, 2009.
- [51] Ebert P R, Wood D H. The near wake of a model horizontal axis wind turbine—I: experimental arrangements and initial results[J]. *Renewable Energy*, 1997, **12**(3): 225-243.
- [52] Ebert P R, Wood D H. The near wake of a model horizontal axis wind turbine—part 3: properties of tip and hub vortices[J]. *Renewable Energy*, 2001, **22**(4): 461-472.
- [53] Vermeer L J, Sorensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. *Prog Aero Sci*, 2003, **39**(6/7): 467-510.
- [54] Mast E H M, Vermeer L J, Van Bussel G J W. Estimation of the circulation distribution on a rotor blade from detailed near wake velocities[J]. *Wind Energy*, 2004, **7**(3): 189-209.
- [55] 朱春建, 胡丹梅, 杜朝辉. 水平轴风力机三维气动特性实验[J]. 能源技术, 2005, **26**(3): 93-96. (ZHU Chun-jian, HU Dan-mei, DU Zhao-hui. Aerodynamic characteristics experiments on horizontal axis wind turbine[J]. *Energy Technology*, 2005, **26**(3): 93-96. (in Chinese))
- [56] Smith G H, Grant I, Liu A, Infield D, Eich T. The wind tunnel application of particle image velocimetry to the measurement of flow over a wind turbine[J]. *Wind Engineering*, 1991, **15**(6): 301-317.
- [57] Grant I, Parkin P, Wang X. Optical vortex tracking studies of a horizontal axis wind turbine in yaw using laser-sheet flow visualization[J]. *Exp Fluids*, 1997, **23**(6): 513-519.
- [58] Grant I, Parkin P. A DPIV study of the trailing vortex elements from the blades of a horizontal axis wind turbine in yaw[J]. *Exp Fluids*, 2000, **28**(4): 368-376.
- [59] Grant I, Mo M, Pan X, Parkin P, Powell J, Reinecke H, Shuang K F, Coton F, Lee D. An experimental and numerical study of the vortex filaments in the wake of an operational horizontal-axis wind turbine[J]. *J Wind Eng and Ind Aero*, 2000, **85**(2): 177-189.
- [60] Maeda T, Kinpara Y, Kakinaga T. Wind tunnel and field experiments on wake behind horizontal axis wind turbine[J]. *Trans Jap Soc Mech Eng*, 2005, **71**(701): 162-170.
- [61] Massouh F, Dobrev I. Exploration of the vortex wake behind of wind turbine rotor[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2007, **75**(1): 1-9.
- [62] Miller R H. Free wake techniques for rotor aerodynamic analysis—Vol **1**: summary of results and background theory[R]. NASA CR166434, 1982.
- [63] Schepers J G, Snel H, Boorsma K. IEA Task 29 mexnext: analysis of wind tunnel measurements from the EU project MEXICO[C]//*Proceedings of EAWE Conference ‘The Science of Making Torque From the Wind’*. Crete, 2010.
- [64] Schepers J G, Pascal L, Snel H. First results from mexnext: analysis of detailed aerodynamic

- measurements on a 4.5 m diameter rotor placed in the large German Dutch wind tunnel DNW [C]//*Proceedings of European Wind Energy Conference*. Warsaw, 2010.
- [65] Schepers J G, Boorsma K, Bon A. Results from mexnext: analysis of detailed aerodynamic measurements on a 4.5 m diameter rotor placed in the large German Dutch wind tunnel DNW [C]//*Proceedings of European Wind Energy Conference*. Brussels, 2011.
- [66] Snel H, Schepers J G, Montgomerie B. The MEXICO project: the database and first results of data processing and interpretation[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2007, **75**(1): 012014.
- [67] WANG Tong-guang, WANG Long, ZHONG Wei, XU Bo-feng, CHEN Li. Large-scale wind turbine blade design and aerodynamic analysis[J]. *Chin Sci Bull*, 2012, **57**(5): 466-472.

Progress in Wind Turbine Wind Tunnel Test Technology and Research Works

XIAO Jing-ping^{1,2}, CHEN Li^{1,2}, WU Jie^{1,2}, DUAN Xue-feng²

(1. *State Key Laboratory of Aerodynamics, Mianyang, Sichuan 621000, P.R.China;*

2. *China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, P.R.China*)

Abstract: Based on the background of UAE phase VI and MEXICO preoject as well as related research works in CARDC, the recent progress in wind turbine measurement technologies such as flow field and pressure distribution and aerodynamic load measurement technology was summarized. Some important research results have also been introduced, such as results of wind tunnel effect, determination of equivalent far-field free coming flow conditions for blade-element, 3D rotation effect, dynamic inflow effect, the flow field structure and the induced effects, etc. the wind tunnel experimental research works and some ideas on large wind turbine of CARDC were also simply introduced.

Key words: wind turbine; aerodynamics; wind tunnel test

Foundation item: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2014CB046205)