

定桨距变转速风力机气动性能测试与流场测量*

高翔, 胡骏, 王志强, 张晨凯

(南京航空航天大学能源与动力学院 南京, 210016)

摘要 针对非并网风电系统, 搭建了风力机性能测试平台, 设计了流场测量系统。利用该平台和测试系统, 通过改变磁粉制动器的励磁电流实现对风轮转速的高精度控制。通过测量分析发现了风轮后气流旋转方向与风轮旋转方向相反的规律, 得到了输出功率越大, 其尾迹内气流的轴向速度越小的结论。该实验结果为定桨距变转速风力机的转速控制策略制定提供了依据, 也为非并网风电系统风力机的优化和设计提供了参考。

关键词 非并网风电; 定桨距变转速风力机; 扭矩; 功率; 速度分布; 流场测量; L 型五孔探针

中图分类号 TK83

引言

风能是当前最有开发利用前景和技术最成熟的新能源和可再生能源。我国的风力发电技术和设备生产能力进步很快, 风能发电有较大的发展, 电站的规模也将不断大型化^[1]。由中大型(百千瓦~兆瓦级)风力发电机组成的风电场所发的电目前只有并网一种选择。一是由于现在铅酸蓄电池的循环寿命短, 而其他的大规模蓄电技术尚少为人知; 二是顺着西欧的思路, 人们的注意力过分集中在“风电并网”上。近年来有专家提出中国风电发展的另一种选择——非并网风电。所谓“非并网风电”, 就是大规模风电的终端负荷不再是电网, 也与铅酸蓄电池配套的小型独立运行供电系统不同, 而是将风电直接输送到某些特殊的企业^[2]。当前的主流机型以变桨距变速机型为主, 不仅能在额定风速以下实现最大功率跟踪控制, 还可以通过调节桨距角实现额定风速以上恒功率运行。然而, 大功率风力机的叶片质量重达几吨甚至几十吨, 叶片、轮毂连接处的轴承需要承受巨大的应力, 容易出现机械上的疲劳损坏。同时, 桨距调节需要独立的调节控制系统, 也增加了系统的复杂性, 降低了可靠性。受材料和制作工艺水平的限制, 目前我国风电机组中的变距轴承主要靠进口。定桨距风力机桨叶与轮毂直接刚性连接,

其结构简单, 可靠性较变桨距风力机高^[3]。对于非并网风电, 系统的可靠性比风能的利用效率显得更为重要。若能很好地实现定桨距风力机的控制, 无疑在非并网风电中有很好的应用前景。

风能向有用能的转换分为两个环节: 第 1 个环节是从风中获取风能并通过涡轮轴转化为机械能; 第 2 个环节是将机械能转化为可用的能量, 如电能。第 1 个环节涉及的领域是空气动力学。风力机气动设计和性能的预估是风能利用的关键。不管是在研究过程还是在设计过程, 准确地预估风力机风轮叶片的动力输出具有重要意义, 需要对风力机的流场结构细节有所了解^[4]。流场结构尤其是尾迹结构决定了风力机的气动性能, 直接影响风力机的输出功率、风能利用率、结构动态特性、叶片载荷分布和噪声等; 因此有必要采用实验手段对风力机尾迹流场分布规律进行研究。文献[5]对 NREL 第 VI 期风轮叶片的流场进行了数值模拟研究。文献[6]利用 PIV 技术在风洞闭口段对一个微型风力机进行了来流、叶尖和尾迹区的流场测量。文献[7-10]使用 PIV 技术和三维热线风速仪研究了旋转叶片的尾迹。文献[11]在直流式低速风洞中采用 PIV 手段对水平轴风力机叶尖涡流动进行了研究。

本研究的对象为一非并网风电系统中的小型定桨距变转速风力机风轮。为了研究给定风速下不同转速下风力机的特性, 搭建实验平台。拟采用 L 型

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助; 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11_0224); 国家重点基础研究发展规划(“九七三”计划)资助项目(2007C210301)

收稿日期: 2013-08-15; 修回日期: 2013-10-10

五孔探针来测量风力机尾迹的流场,探索小型定桨距变转速风力机在不同工况下的尾迹结构特征。

1 实验设备

图 1 为实验系统的简图。

1.1 风轮叶片

实验风轮是由 3 个标准 STORK 5.0 WPX 叶

片组成的定桨距风轮,直径为 0.75 m,安装形式为上风向、水平轴。叶片造型采用 8 个翼型截面来确定,其模型如图 2 所示。

1.2 风洞

实验是在南京航空航天大学平面叶栅实验风洞的开口处进行。该风洞由一台 30 kW 的离心风机作为动力源,内有一个蜂窝器和两层阻尼网,使得出口气流较均匀,湍流度较小。风洞开口处直径为

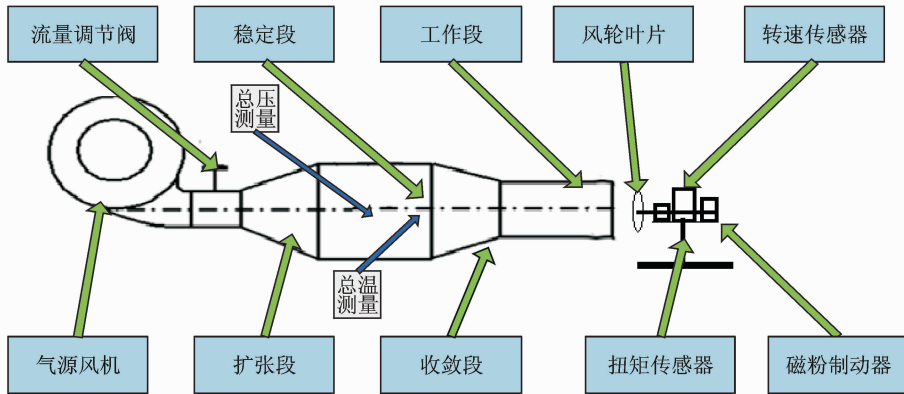


图 1 实验系统基本结构简图
Fig.1 Experimental system diagram

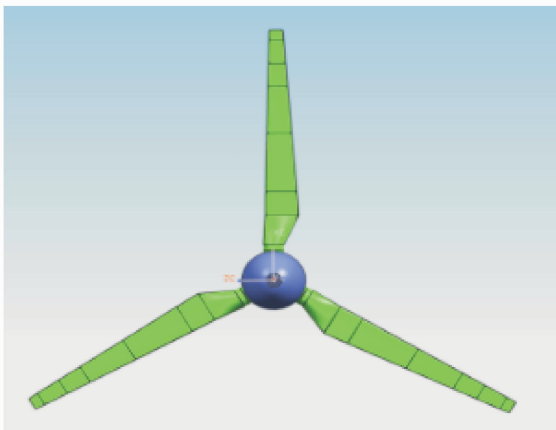


图 2 风轮 UG 模型
Fig.2 Wind turbine model



图 3 转速测量与控制系统
Fig.3 Speed test and control system

0.9 m,最大风速为 10 m/s。

1.3 测试系统

风轮的转速由一台测功机控制;通过转速传感器、扭矩传感器测得当前的转速和扭矩,将转速和扭矩信号通过测功机处理后来控制磁粉制动器的电流从而对风轮转速进行控制,如图 3 所示。转速的控制精度为±5 r/min。

1.4 L型五孔探针

为了实现用位移机构带动五孔探针测量风轮尾迹的流场,本研究沿用了文献[12]设计的 L 型五孔探针,结构如图 4 所示。五孔探针的主杆直径为 6 mm,固定在位移机构上,其头部风轮尾迹流场中,探针头部为锥形,直径 d 为 3 mm,测压孔的孔径为 0.6 mm。位移机构带动探针做上下、前后移动,可以实现一个截面的测量。详细标定过程参见文献[12]。

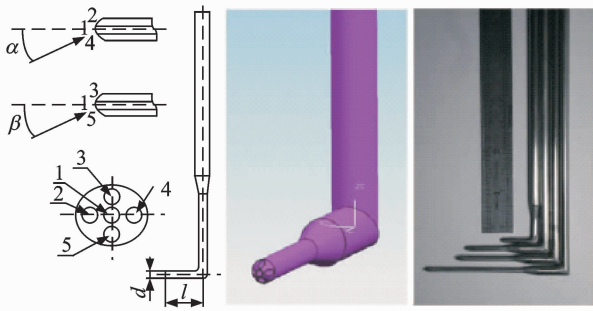


图 4 L 型五孔探针结构示意图及其照片

Fig. 4 Structure diagram and photos of the L type five-hole probe

1.5 压力采集系统

本研究中的气体压力数据由美国 PSI 公司生产的 DTCnet 压力扫描阀系统采集。该系统由 DTCnet 压力扫描阀、电源模块和 90DC 模块等主要组件以及标准的 100Base-T 直连网线、ESP-64HD 压力扫描阀连接电缆和 RS232 串行通信电缆等附件,并配备专门的数据采集软件 PSI9016 V3.0。本研究实验稳态压力测量的量程均为 0.36PSI(2 481 Pa),测量精度为 1.24 Pa。

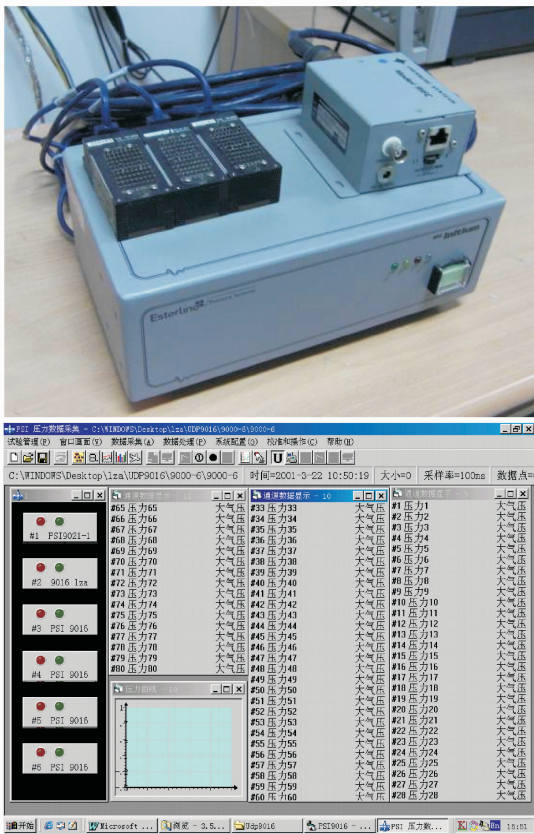


图 5 压力测量采集系统及其软件界面

Fig. 5 Pressure acquisition system and the UI

2 实验方案

采用位移机构带动的 L 型五孔探针对风力机风轮尾迹的流场进行测量,风速为 6 m/s。首先改变风轮转速,测得不同转速下风轮的输出扭矩;然后将风轮转速固定在某个值,通过位移机构带动 L 型五孔探针测量风轮后流场。L 型五孔探针测点分布如图 6 所示。

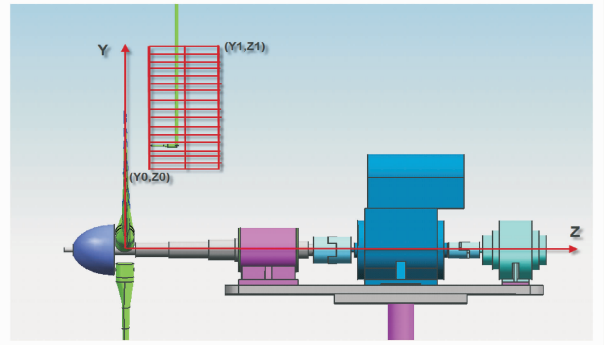


图 6 L 型五孔探针测点分布

Fig. 6 Test Grid of the L type five-hole probe

3 实验结果和分析

3.1 风轮气动性能

图 7(a)为在 6 m/s 风速下测得的扭矩随转速变化曲线。根据式(1)得到图 7(b)中的功率随转速变化曲线

$$P = \Omega T \quad (1)$$

其中: P 为功率; Ω 为风轮旋转角速度; T 为测得的扭矩。

将测得的扭矩和功率分布结合风轮工作原理可知,在风轮转速为 500~1 000 r/min 段,风轮处于失速区,此时的输出扭矩和功率都较小;当转速达到 1 150 r/min 时,扭矩和功率到达最高值;此后随着转速的提高,周向速度增大,虽然流动为附着流动,但该升力型风轮获得的升力减小,所提供的扭矩和功率下降。

3.2 风轮尾迹流场分析

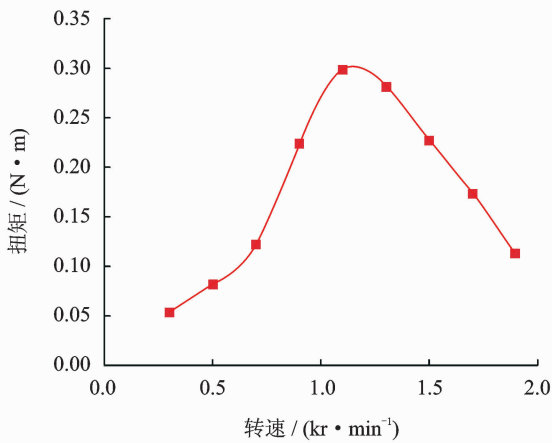
风轮的尾迹流场测量选择两个工况点进行,分别选小转速 $n=700$ r/min 和大转速 $n=1.5$ kr/min。这两个工况点下输出功率前者小、后者大。

当转速为 700 r/min 时,由图 8(a)可以看出,在 3 个轴向位置上($z=138, 168, 198$ mm)实验测得的

周向角度 α 为负值,这说明尾迹区气流的流动方向与风轮的旋转方向相反(正方向为风轮旋转方向)。从图 9(a)切向速度分布可见,在叶尖部对应的尾迹区切向速度较小。由图 8(b)和图 9(b)可得,实验测得的径向速度(或 β 角)沿径向变化不是很大。随着径向位置的增加,径向速度略微有所减小, β 角度也从 7° 左右减小到 2.5° 左右,同时随着轴向位置的增加,越往下游,径向速度越小。图 9(c)为轴向速度的分布,可以看出轴向速度沿径向和轴向变化都不是很明显。

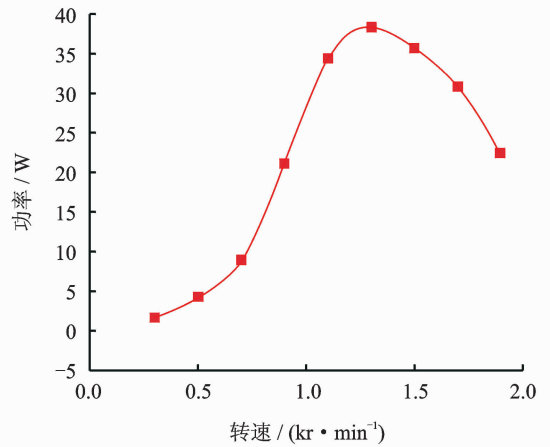
由图 10(a)和图 11(a)可以看出,当风轮转速为 1.5 kr/min 时,风轮尾迹区切向速度(或 α 角度)比 700 r/min 时要大,此时在每个径向位置上叶片的

相对来流攻角比 700 r/min 时要小。方向为负方向即尾迹流动的方向与风轮旋转的方向相反。该转速下实验测得的径向速度(或 β 角)的分布沿径向是逐渐增大的,在叶尖处径向流动愈发明显,如图 10(b)和图 11(b)所示。轴向速度的分布如 11(c)所示,沿着径向分布出现了变化,呈现出中心高、叶尖处低的分布。将 1.5 kr/min 下尾迹区的轴向速度与 700 r/min 下的实验值相比较可得,高转速下尾迹区轴向速度下降很多。结合功率测量结果可知,相比于 700 r/min 转速, 1.5 kr/min 转速的工况下风轮的输出功率更高,此时尾迹区的轴向速度比前者小,而周向和径向速度变化不大。可见,风轮的输出功率对尾迹区的轴向速度影响较大,输出功率越高,尾迹



(a) 扭矩随转速变化曲线

(a) Torque of the wind turbine vs. rotating speed

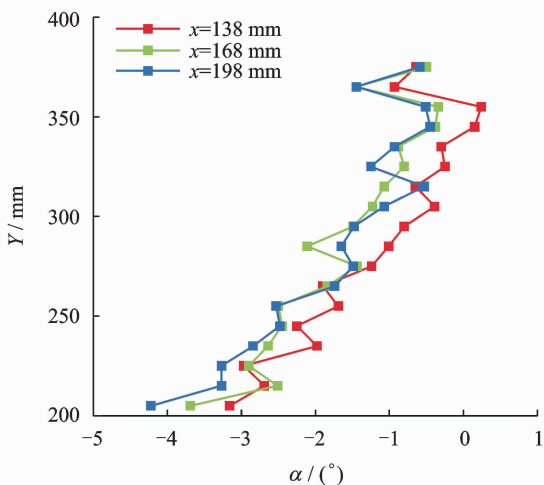


(b) 功率随转速变化曲线

(b) Power of the wind turbine vs. rotating speed

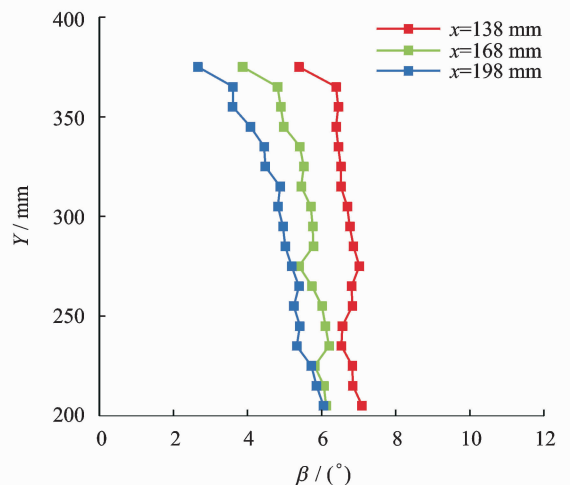
图 7 风轮扭矩和功率

Fig. 7 Torque and power of turbine



(a) α 沿径向分布

(a) Radial distribution of α



(b) β 沿径向分布

(b) Radial distribution of β

图 8 转速为 700 r/min 时,在下游 3 个轴向位置速度矢量的角度

Fig. 8 Angle of the flow at 700 r/min

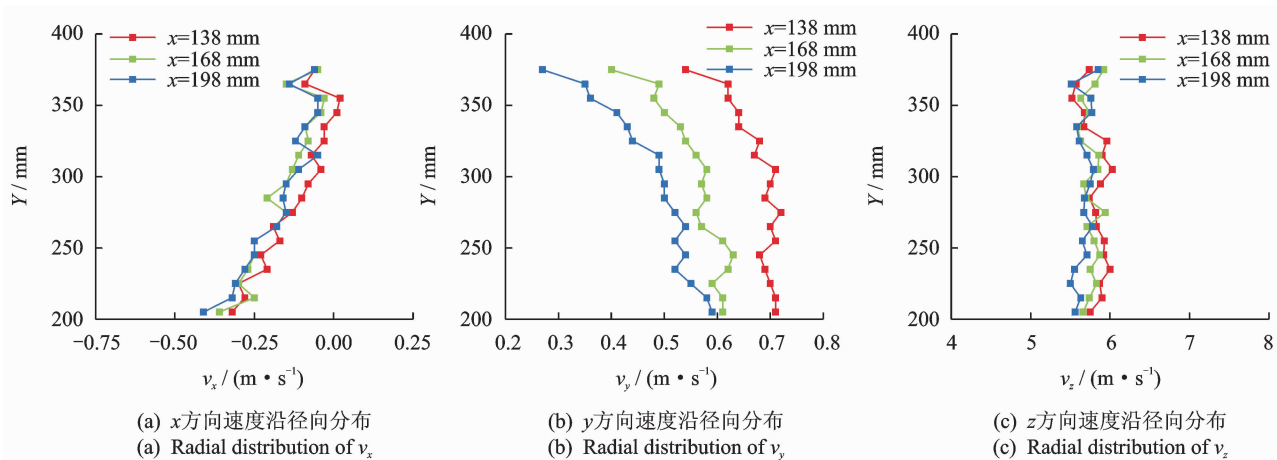


图9 转速为700 r/min时,在下游3个轴向位置3个方向速度大小

Fig. 9 Velocity component of the flow at 700 r/min

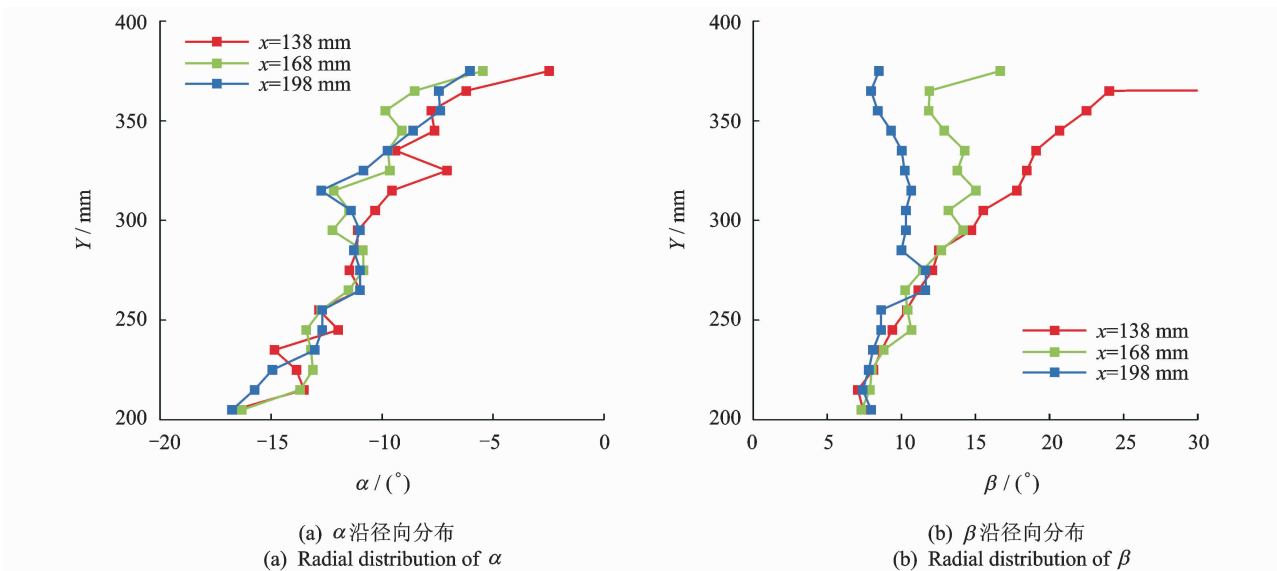


图10 转速为1.5 kr/min时,在下游3个轴向位置速度矢量的角度

Fig. 10 Angle of the flow at 1.5 kr/min

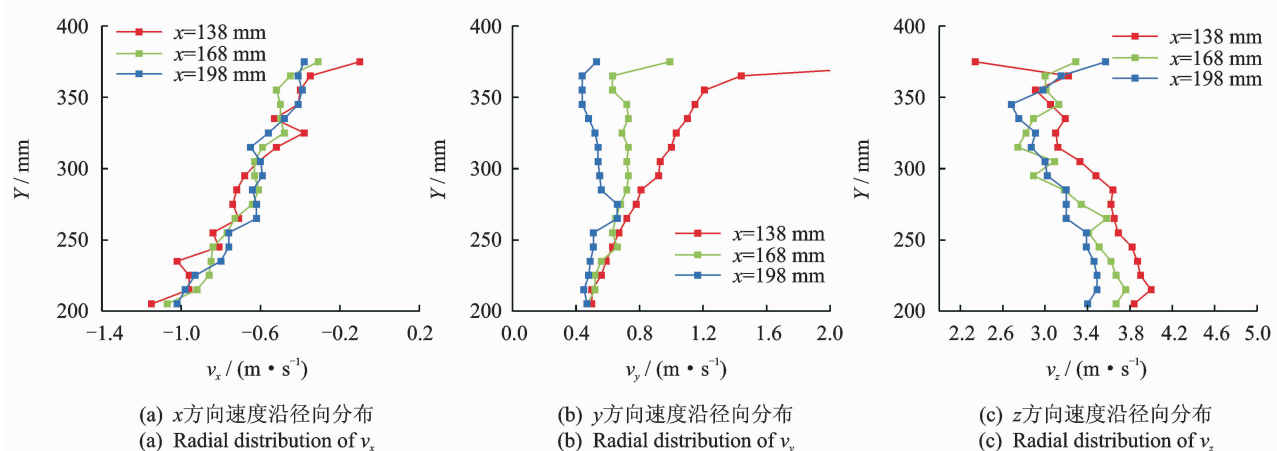


图11 转速为1.5 kr/min时,在下游3个轴向位置3个方向速度大小

Fig. 11 Velocity component of the flow at 1.5 kr/min

区的轴向速度越小。

4 结 论

1) 采用磁粉制动器消耗功来控制风轮转速,进而通过扭矩传感器获得风轮的扭矩特性。

2) 通过 L 型五孔探针,测量风轮尾迹的平均流场,发现不管是在大转速还是小转速下,风轮尾迹内气流方向与风轮旋转方向相反。

3) 转速为 700 r/min 时,风轮尾迹区径向速度沿径向略微有所减小,沿轴向越向下游越小,而轴向速度沿径向和轴向变化都不大。

4) 转速为 1.5 kr/min 时,风轮尾迹区径向速度在上游位置沿径向明显减小,而下游两个位置沿径向变化不大;轴向速度沿径向减小,且此时的轴向速度比 700 r/min 时整体要小。认为输出功率越大,其尾迹内气流的轴向速度越小。

参 考 文 献

- [1] 白文斌. 世界风电发展现状及前景展望[J]. 科技情报开发与经济, 2012, 22(22): 129-132.
Bai Wenbin. The current development situation and prospect forecast of the wind energy in the world[J]. SCI-TECH Information Development & Economy, 2012, 22(22): 129-132. (in Chinese)
- [2] 顾为东. 大规模非并网风电系统开发与应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 14-20.
Gu Weidong. Development and application of large-scale non-grid-connected wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 14-20. (in Chinese)
- [3] 陈杰, 陈冉, 陈志辉, 等. 定桨距风力发电机组的主动失速控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 98-103.
Chen Jie, Chen Ran, Chen Zhihui, et al. Active stall control of fixed-pitch wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 98-103. (in Chinese)
- [4] 杜朝辉, 刘富斌. 旋转对风力涡轮叶片边界层的影响[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(8): 962-973.
Du Zhaohui, Liu Fubin. Effect of rotation on blade boundary layer of wind turbine[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(8): 962-973. (in Chinese)
- [5] Sørensen N N, Michelsen J A, Schreck S. Navier-stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA ames 80 ft×120 ft wind tunnel[J]. Wind Energy, 2002, 5(2-3): 151-169.
- [6] Hiroyuki H, Hossain M Z, Kawahashi M. Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes [J]. Renewable Energy, 2005, 30(99): 1279-1297.
- [7] Hu Danmei, Tian Jie, Du Chaohui. PIV experimental study on the wake flow of horizontal-axis wind turbine model[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28(2): 200-206.
- [8] Hu Danmei, Zhu Xiaocheng, Du Chaohui. Wake measurements of a model horizontal-axis wind turbine using hot-wire technique [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(1): 7-13.
- [9] Hu Danmei, Tian Jie, Du Chaohui. Measurement and analysis of wake behind horizontally orientated air turbines[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(5): 751-760.
- [10] Hu Danmei, Ouyang Hua, Du Chaohui. An experimental study of the wake structure of a model horizontal-axis wind turbine[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(6): 606-612.
- [11] Gao Zhiying, Wang Jianwen, Dong Xueqing. PIV experiment on tip vortex flow of horizontal axis wind turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(3): 414-418.
- [12] 王志强. 高压压气机低速模拟方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.



第一作者简介:高翔,男,1983年1月生,博士研究生。主要研究方向为叶轮机械气动热力学、压气机中的非定常流、航空发动机总体性能、风力发电机气体动力学和控制技术。曾发表《Numerical research of Reynolds number impact on scale model of wind turbine》(《The 1st World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, WNWEC 2009》, Nanjing, China; [s. n.], 2009.) 等论文。

E-mail: abrahamgx@163.com