

风力机尾流场及相互作用的实验研究

杨 瑞^{1,2}, 王小丽¹, 王 强¹, 张志勇¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省风力机工程技术研究中心, 兰州 730050)

摘 要:运用压差式精密风速仪对风力机尾流场及相互作用进行测量研究。对于单台风力机, 测量其后不同距离处的尾流场轴向速度; 对于两台风力机, 测量下游风力机(第二台风力机)后不同距离处的尾流场轴向速度, 由于下游风力机置于上游风力机(第一台风力机)尾流场中, 尾流在向下扩展的过程中相互叠加影响, 使得下游风力机尾流场变化更复杂。试验结果表明: 由于风轮旋转和来流衰减, 使得单台风力机后尾迹区存在速度亏损, 尾迹区速度亏损随着风轮下游轴向距离的增加逐渐减弱, 且轴向速度和轴向诱导速度在水平方向上表现出较强的对称性。由于风轮旋转时叶尖涡脱落, 在距测量中心较远处出现高速度区域。当下游风力机置于上游风力机尾流场时, 下游风力机的尾迹区内速度亏损更严重, 由于上游风力机尾流的不稳定延伸, 尾流叠加, 轴向速度和轴向诱导速度出现明显的波动现象, 且随着两风力机距离及下游风力机后轴向距离的增加, 上游风力机对下游风力机的影响逐渐减弱。

关键词:风力机; 尾流场; 相互作用; 轴向速度; 轴向诱导速度; 实验研究

中图分类号:TK83

文献标志码:A

引 言

风在经过旋转的风轮时发生能量损失, 且在风轮下游形成不均匀的低速尾流区。尾流区可分为近尾流区和远尾流区, 近尾流区对风力机的功率和其它性能有很大的影响, 远尾流区主要研究尾流模型、地形影响、湍流模型等的选取, 更着重于研究风电场机组间的相互干扰^[1]。风力机尾流之间的相互作用是风电场功率损失的一个重要来源。在早期, 由于商业风资源评估模型所用的尾流模型是非常基本的, 所以不能准确预测尾流对风电场功率的影响。与 Ainslie and Jensen 等人^[2]的基本模型相比, Frandsen 等人^[4]提出了改进的尾流模型, 主要针对多种尾流情况下的风电场功率预测。然而, 风力机远尾流场的不稳定现象及多台风力机尾流相互作用的现象没有在这些模型中得到研究。另一方面, Larsen 等人^[5,6]及 Trujillo and Kühn^[7]的研究

表明: 风力机尾流的相互作用对风力机叶片的气动弹性和疲劳问题有很大的影响。从以上两个方面可以看出, 对风力机尾流的研究很有必要。本文利用轴流式鼓风机提供来流, 使用压差式精密风速仪对单台及两台风力机情况下的尾流场进行测量, 且通过对比分析, 获得尾流区域速轴向度场及轴向诱导速度场的变化情况。

1 实验原理

1.1 风力机尾流测量范围

风力机尾流的发展变化一般经过三个阶段: 首先是膨胀延伸, 其次是非均匀延伸(尾流范围不在扩大), 最后与外界大气逐渐融合, 且风力机尾流场的整个变化过程是不稳定的。在尾流研究中, Jensen 模型是最基本的尾流模型, 实验中风力机尾流场的测量范围根据 Jensen 公式^[8,9]设定:

收稿日期:2015-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(11162009)

作者简介:杨 瑞(1970-), 男, 河南夏邑人, 教授, 博士, 主要从事风力机气动特性及结构方面的研究, (E-mail)lutwind@163.com;

王小丽(1990-), 女, 甘肃静宁人, 硕士生, (E-mail)landielin@163.com

$$r = r_f \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \quad (1)$$

式中:为轴向诱导因子,是为风轮半径。根据贝茨极限,当风轮直径 $d = 1.07 \text{ m}$ 时,其远尾流区半径约为 0.756 m 。

1.2 皮托管测风原理

风力机尾流场的测量采用 MP-120S 手持式压差风速仪,传感器含压差调零功能,与皮托管搭配测量风速,如图 1 所示。在理想不可压缩流体中,皮托管测速原理为:

$$P_0 - P = \frac{\rho U^2}{2} \quad (2)$$

式(2)表明:知道流场中的总压和静压,其压差即为动压,由动压可算出流体(风)的速度 U :

$$U = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}} \quad (3)$$

式中:为流场总压;为流场静压; U 为流体速度,这里指风速;为流体密度,这里取 1.225 kg/m^3 。

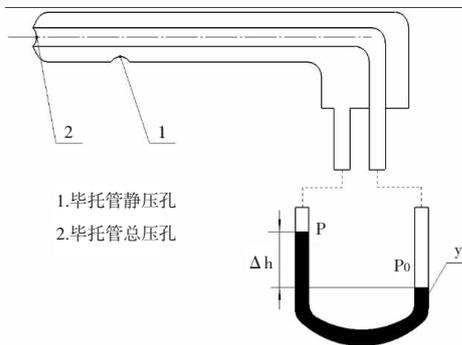


图1 皮托管测速原理图

2 实验设备

考虑到天气等外界因素,实验在兰州理工大学风洞实验室进行。实验采用三台 7.5 kW 轴流式鼓风机提供实验来流,其转速为 1450 rpm ,且鼓风机安装整流罩,保证了实验来流的均匀性;选用的两台小型水平轴风力机,叶片数为3,直径为 1.07 m ,额定功率为 100 W ,启动风速为 3.5 m/s ,额定风速为 12.5 m/s ,极限风速为 45 m/s ;选用的L型皮托管长度为 2 m ,直径为 12 mm ;其它实验设备还包括蓄电池、逆变器、变频器、电流表、电压表、测量板、铁架等。蓄电池作为风力机的负载,将两台风力机发出的电通过控制器、电流表、电压表、功率表,接入蓄电池,通过逆变后供电灯泡,功率表用来随时监测风力机功率。在实验过程中鼓风机、风力机及测量板中心在同一水平面,距地面 1.5 m ,且风力机和测量板中心在同一轴向水平线。

为保证实验的合理性和准确性,实验选取较大的尾流测量范围,即测量板的半径取 1.3 m ,平均分为10段,

每段 0.13 m 。分别选取与地面平行(y 方向)和垂直(z 方向)的两个方向进行测量,测量范围和测量点布置如图2所示:

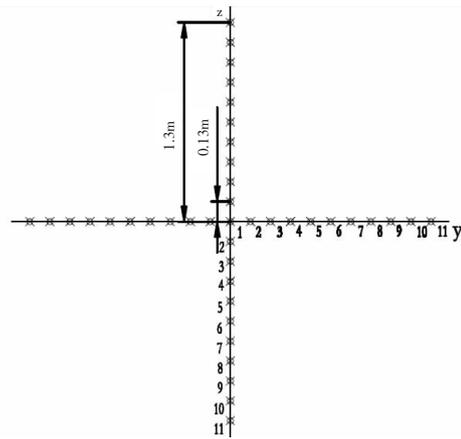


图2 测量范围及测点布置示意图

3 实验过程

3.1 单台风力机尾流场的测量

将一台 100 W 水平轴风力机置于三台 7.5 kW 鼓风机后 2 m 处,调节鼓风机,使来流风速约为 12.5 m/s 。为了保证测量结果的准确性,对风力机后 $3D$ 、 $5D$ 、 $8D$ 处的尾流场进行多次测量。由于鼓风机提供的来流随着轴向(x 方向)距离的增加出现衰减,随后对无风力机的情况进行多次测量,得到 $3D$ 、 $5D$ 、 $8D$ 处的尾流场分布,如图3(a)所示。

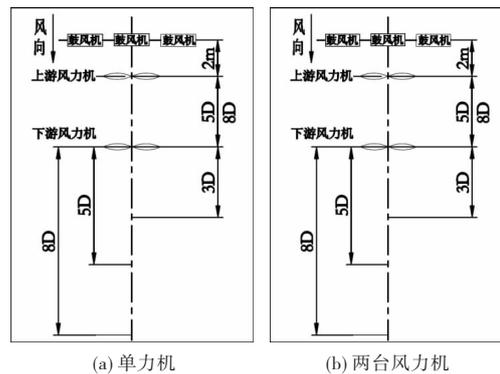


图3 不同情况下风力机尾流实验示意图

3.2 两台风力机尾流场相互作用的测量

实验时,将两台 100 W 小型水平轴风力机置于三台 7.5 kW 鼓风机后,保证来流风速约为 12.5 m/s 。上游风力机距鼓风机 2 m ,下游风力机以上游风力机为基准,置于其后不同的位置,如图3(b)所示。下游风力机全部置于上游风力机的尾流场中,对下游风力机后 $3D$ 、 $5D$ 、 $8D$ 的尾流场进行多次测量。由于鼓风机提供的来流随着轴向距离的增加出现衰减,随后也对无下游风力机的

情况进行多次测量,得到3D、5D、8D处的尾流场分布。

4 实验结果及分析

4.1 单台风力机尾流场测量结果与分析

对有风力机和无风力机两种情况下流场的多次测量结果取平均值,通过计算得到轴向速度分布,且对同一测量点处无风力机和有风力机的轴向速度

取差值(无风力机时的轴向速度值减去有风力机时的轴向速度值),得到该测量点的轴向诱导速度。对不同方向上的尾流场轴向速度和轴向诱导速度进行曲线拟合,通过对比分析,得到风力机尾流场的变化情况,如图4所示。

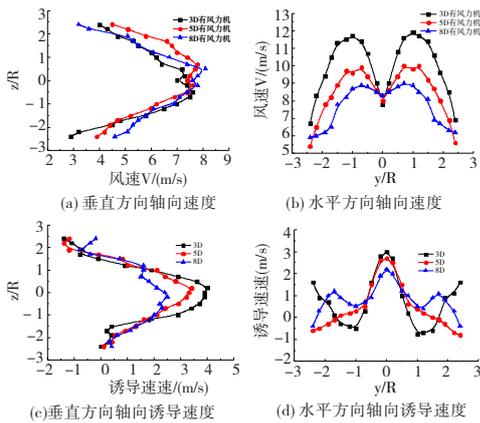


图4 单机后不同距离处的轴向速度与轴向诱导速度

图4(a)与图4(b)分别为单机垂直和水平方向上轴向速度变化曲线图。可以看出,随着垂直方向和水平方向距离的增大(由中心点向两边增大),尾流场轴向速度先增大后减小,与水平方向相比,垂直方向上轴向速度从中心向两侧增大的幅度较小。随着轴向(x 方向)距离的增加,水平方向上轴向速度整体减小幅度较大,轴向速度先增大后减小的变化趋势逐渐减小,且表现出很强的对称性。

图4(c)与图4(d)分别为单机垂直和水平方向上轴向诱导速度变化曲线图。从图中可以看出,轴向诱导速度随着垂直距离的增大逐渐减小,5D、8D处的轴向诱导速度在时出现增大的变化趋势。轴向诱导速度在水平方向上随着轴向距离的增大变化趋势不一致,但整体表现出一定的对称性。随着水平距离的增大,3D处的轴向诱导速度先减小,在时开始逐渐增大;5D处的轴向诱导速度一直保持递减的变化趋势;8D处的轴向诱导速度则出现先减小后增大再减小的波动变化情况,且两个方向上的轴向诱导速度在远离中心点时出现负值。

对于单风力机,从轴向速度和轴向诱导速度变化的角度可以看出,由于风力机旋转、来流衰减等因素,两个

方向上的轴向速度和轴向诱导速度整体表现出逐渐减小的变化趋势,而垂直方向由于受地面粗糙及塔架的影响,不对称现象比较明显。由于风轮旋转时叶尖涡脱落使得远离测量中心点处出现高速度区域,两个方向不同距离处的轴向诱导速度都出现负值。8D处的轴向速度和轴向诱导速度出现波动现象,说明随着轴向距离的增大,风力机尾流与来流逐渐融合,此处的尾流现象已不是很明显。

4.2 两风力机尾流场相互作用的测量结果与分析

对有风力机和无风力机两种情况下的下游风力机尾流场的多次测量结果取平均值,通过计算得到轴向速度变化情况。对同一测量点处无风力机和有风力机的轴向速度取差值,得到该测量点的轴向诱导速度。对不同方向上尾流场轴向速度和轴向诱导速度进行曲线拟合,通过对比分析,得到尾流场的变化情况。

图5为两风力机距离5D、8D时,下游风力机垂直方向不同距离处的轴向速度变化曲线图。随着垂直方向距离的增大,图5(a)中下游风力机后的轴向速度表现出整体减小的变化趋势。3D处的轴向速度先增大后逐渐减小,5D、8D处的轴向速度则先减小后增大又减小,出现波动现象;图5(b)中轴向速度整体表现为波动变化,8D处轴向速度随着垂直距离的增大逐渐减小。图6为两风力机距离5D、8D时,下游风力机水平方向不同距离处的轴向速度变化曲线图。从图6可以看出,随着水平距离的增大,下游风力机后不同距离处的轴向速度出现先增大后减小的变化趋势,此变化随着风力机之间距离及轴向距离的增大逐渐减小,3D、5D处的变化趋势较明显,8D处的轴向速度主要表现为小幅度的波动。相比于垂直方向,尾流场轴向速度在水平方向的变化表现出较强的对称性。

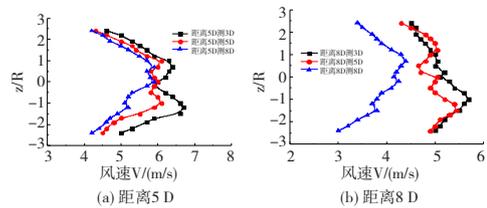


图5 两风力机距离5D、8D时,下游风力机后垂直方向不同距离处的轴向速度

图7为两风力机距离5D、8D时,下游风力机垂直方向不同距离处的轴向诱导速度变化曲线。从图7可以看出,随着垂直方向距离的增大,3D、5D处的轴向诱导速度逐渐减小,8D处的轴向诱导在小范围内波动。图8为两风力机距离5D、8D时,下游风力机水平方向不同距离处的轴向诱导速度变化曲线。图8中的轴向诱导速度随着水平距离的增大先减小后增大,最后再减小。

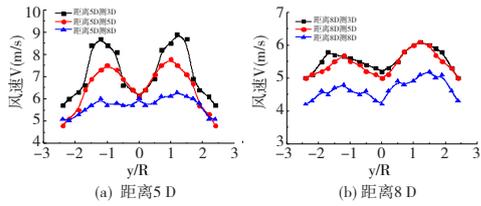


图6 两风力机距离5D、8D时,下游风力机后水平方向不同距离处的轴向速度

当两风力机距离5D时,变化幅度较大;随着风力机之间距离及轴向距离的增大,变化幅度逐渐减小。和垂直方向相比,轴向诱导速度也在变化过程中表现出较强的对称性。

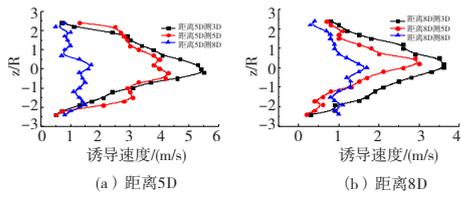


图7 两风力机距离5D、8D时,下游风力机后垂直方向不同距离处的轴向诱导速度

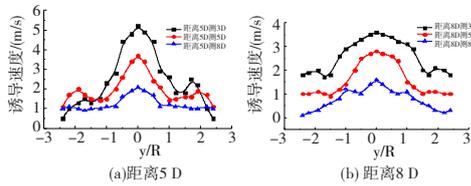


图8 两风力机距离5D、8D时,下游风力机后水平方向不同距离处的轴向诱导速度

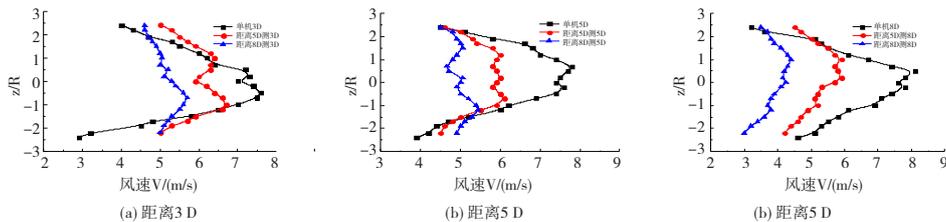


图9 垂直方向不同情况不同距离处的轴向速度

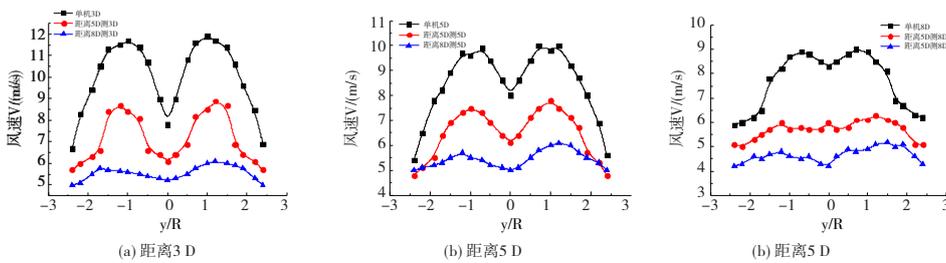


图10 水平方向不同情况不同距离处的轴向速度

图11为垂直方向单机、两风力机距离5D、8D时,风力机后不同距离处的轴向诱导速度变化曲线;图12为水平方向单机、两风力机距离5D、8D时,风力机后不同距离处的轴向诱导速度变化曲线。从图11~图

总结两台风力机尾流场相互作用的曲线图,从轴向速度和轴向诱导速度的变化角度可以看出,下游风力机的尾流变化除了受自身旋转、来流衰减、地面粗糙度等因素的影响外,由于上游风力机不均匀尾流场非对称延伸、尾流叠加,使得下游风力机尾流场的变化情况更加复杂。3D、5D处的尾流场受上游风力机尾流的影响较大,变化趋势及变化幅度较明显,8D处的尾流场受上游风力机尾流的影响较小,且与来流逐渐融合,表现出小幅度波动现象。由于来流衰减,恢复后的尾流场速度小于来流风速。

4.3 不同情况下风力机尾流场的比较分析

图9为垂直方向单机、两风力机距离5D、8D时,风力机后不同距离处的轴向速度变化曲线;图10为水平方向单机、两风力机距离5D、8D时,风力机后不同距离处的轴向速度变化曲线。从图9~图10可以看出,由于风轮旋转,在风轮后中心点处形成低压区,所以轴向速度较小,随着垂直距离和水平距离的增大,轴向速度逐渐增大,由于来流衰减,轴向速度又逐渐减小。在整个变化过程中,水平方向上轴向速度变化对称性较强,由于地面粗糙度及塔架的影响,垂直方向变化不对称,且随着两风力机之间距离及轴向距离的增大,下游风力机轴向速度逐渐减小。随着垂直方向和水平方向距离的增大,不同情况下各截面处的轴向速度值逐渐接近。

12中可以看出,轴向诱导速度与轴向速度变化趋势相反。单机轴向诱导速度变化幅度较大,变化过程比较单一,受风轮自身旋转的影响,风轮下游的尾迹区内存在速度亏损,随着轴向距离的增大,轴向诱导速度逐渐

减小,说明尾迹区速度亏损随着风轮下游轴向距离的增加逐渐减弱;两风力机时,轴向诱导速度变化幅度较平缓,随着风力机之间距离及轴向距离的增大,轴向诱导速度变化幅度逐渐减小。由于上游风力机的影响,下游风力机的尾迹区内速度亏损更严重,且由于上游

风力机尾流的不稳定延伸,处于尾流区的下游风力机尾流变化情况更加复杂,尾流叠加,出现明显的波动现象;两风力机距离越小,影响越明显,随着下游风力机后轴向距离的增加,上游风力机对下游风力机的影响逐渐减弱。

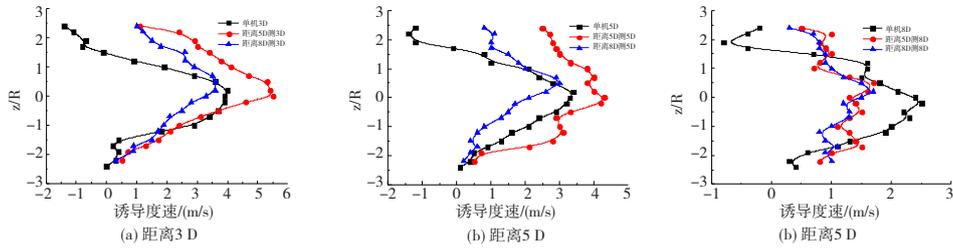


图 11 垂直方向不同情况不同距离处的轴向诱导速度

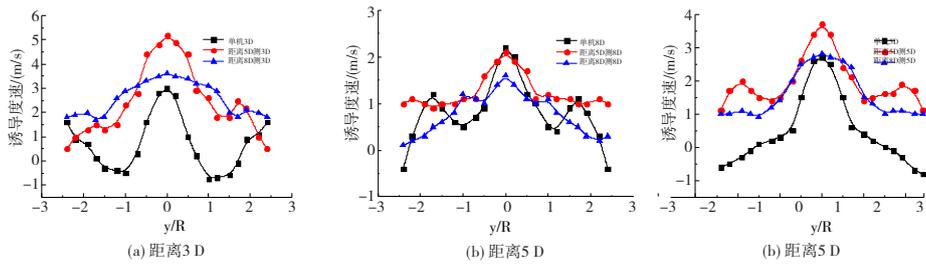


图 12 水平方向不同情况不同距离处的轴向诱导速度

4.4 不同情况同一距离处风力机尾流场的比较分析

图 13 为垂直和水平方向上不同情况同一距离 8D 处的轴向速度变化曲线图;图 14 为垂直和水平方向上不同情况同一距离 8D 处的轴向诱导速度变化曲线图。从图 13 可以看出:单机 8D 距离处的轴向速度在风力机中心附近大于两台风力机串联的情况,但随着垂直距离和水平距离的增大,两种情况下的轴向速度逐渐接近。图 14 中两种情况下的轴向诱导速度变化趋势基本一致,与轴向速度变化相反,单机 8D 距离处的轴向诱导速度在风力机中心附近小于两台风力机串联的情况,且不同情况下水平方向的轴向速度和轴向诱导速度对称性较好。通过对比发现,由于风力机对风能的吸收利用,相同距离时,两台风力机后的轴向速度小于单风力机后的轴向速度。

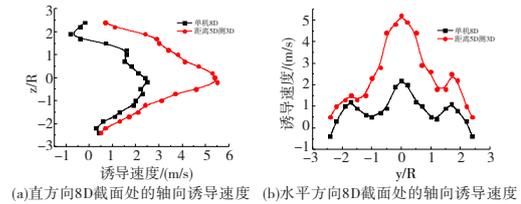


图 14 不同情况同一距离处的轴向诱导速度

5 结 论

(1) 由风轮旋转和来流衰减,单台风力机后尾迹区内存在速度亏损,随着轴向距离的增大,轴向诱导速度逐渐减小,说明尾迹区速度亏损随着风轮下游轴向距离的增加逐渐减弱。轴向速度和轴向诱导速度在水平方向上表现出较强的对称性,而垂直方向上的不对称变化与地面粗糙度、塔架等因素有关。由于风轮旋转时叶尖涡脱落,使得在距测量中心较远处出现高速度区域,因此轴向诱导速度出现负值。

(2) 当下游风力机处于上游风力机的尾流场时,由于上游风力机的影响,下游风力机的尾迹区内速度亏损更严重,且由于上游风力机尾流的不稳定延伸,处于尾流区的下游风力机尾流变化情况更加复杂,尾流叠加,出现明显的波动现象;两风力机距离越小,影响越明显,随着下游风力机后轴向距离的增加,上游风力机对下游

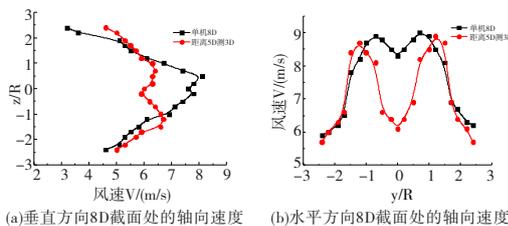


图 13 不同情况同一距离处的轴向速度

风力机的影响逐渐减弱。

(3) 通过不同情况下风力机尾流场的对比分析,发现单机时的尾流场变化比较单一,受风轮自身的影响较大;当下游风力机处于上游风力机的尾流场时,受上游风力机的尾流场不稳定变化的影响,尾迹区内速度亏损严重,且尾流场叠加作用,下游风力机尾流场轴向速度和轴向诱导速度变化幅度较平缓,同时出现波动现象。说明来流湍流度对风力机尾流变化有影响,湍流度越大,尾流变化越幅度越小,波动现象越明显。

参考文献:

- [1] Vermeer L J, Sorensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics [J]. *Progress in Aerospace: Sciences*, 2003, 39(6-7): 467-510.
- [2] Ainslie J P. Calculating the flow field in the wake of wind turbines [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 27(1-3): 213-224.
- [3] N Jensen. A note on wind generator interaction [R]. Technical Reports ris-m-2411, Risø National Laboratory, 1983.
- [4] Frandsen S, Barthelmie R, Pryor S, et al. Analytical modeling of wind speed deficit in large offshore wind farms [J]. *Wind Energy*, 2006, 9(1-2): 39-53.
- [5] Larsen G C, Madsen H A, Thomsen K, et al. Wake meandering a pragmatic approach [J]. *Wind Energy*, 2008, 11(4): 377-395.
- [6] Larsen T J, Madsen H A, Larsen G C, et al. Validation of the dynamic wake meander model for loads and power production in the egmond aan Zee wind farm [J]. *Wind Energy*, 2013, 16(4): 605-624.
- [7] Trujillo J J, Kühn M. Adaptation of a lagrangian dispersion model for wind turbine wake meandering simulation [C]//Proceedings of the EWEA conference, Marseille, France, March 16-19, 2009: 1-8.
- [8] 陈晓明. 风场和风力机尾流模型研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [9] 杨瑞, 夏巍巍, 张昇龙, 等. 风力机尾流场的实验研究 [J]. *四川理工学院学报: 自然科学版*, 2014, 27(2): 23-27.

Experimental Study on the Wake Field and Interaction of Wind Turbines

YANG Rui^{1,2}, WANG Xiaoli¹, WANG Qiang¹, ZHANG Zhiyong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Wind Turbine Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The wake field and interaction of wind turbines are measured by pressure gradient precision anemometer in this paper. For a single wind turbine, the axial velocity of the wake at different distance is measured; for two wind turbines, the axial velocity of wake at different distance after downstream wind turbine (the second wind turbine) is measured. Due to the situation that the downstream wind turbine is located in the wake field of upstream wind turbine (the first wind turbine), the trailing is superimposed in the process of wake downward expansion, and the changes of downstream wind turbine wake field are more complex. The experiment results show that the single wind turbine wake region has speed loss due to the wind wheel rotation and flow attenuation, and the speed loss of wake is decreased gradually with the axial distance increasing of downstream wind turbine. The axial velocity and axial induced velocity show a strong symmetry in the horizontal direction, and there are high velocity regions further away from the center of the measurement because of the shedding of tip vortex when wind turbine blade rotating. The velocity loss in the wake of the downstream wind turbine is more serious when the downstream turbine located in the wake field of upstream wind turbine. Due to the instability extension of upstream wind turbine wake, wake superposition, and the fluctuation phenomenon of axial velocity and axial induced velocity is obvious. Also, the influence of upstream wind turbine on the downstream wind turbine is gradually weakened with the increase of distance between two wind turbines and axial distance of the downstream wind turbine.

Key words: wind turbine; wake field; interaction; axial velocity; axial induced velocity; experimental study