第41卷 第9期 太 阳 能 学 报 Vol. 41, No. 9
2020年9月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Sep., 2020

文章编号:0254-0096(2020)09-0331-07

风电场湍流积分长度演变实验研究

刘惠文[1]，郑 源[1~3]，张玉全[1]，杨春霞[1]，付士凤[3]，张步恩[3]

（1. 河海大学能源与电气学院，南京 211100；2. 河海大学创新研究院，南京 210024；3. 河海大学水利水电学院，南京 210024）

摘 要：实验研究5×3对齐式排布的风电场湍流积分长度（Λ）的演变规律，主流向和展向机组间距分别为10倍和2.5倍风力机直径（d_T）。采用一维热线测速仪获得风电场不同位置的高分辨率流场数据。分析结果表明，Λ在水平面上呈近似对称分布，而在竖直方向上由于受边界层影响呈非对称分布。受旋转风力机的影响，Λ在风力机后方发生剧烈的衰减，而随着外部流场大尺度湍流微团的不断渗入，Λ随下游距离的增加逐步恢复。特别地，从第3排风力机尾流开始，风电场流场基本呈现稳定平衡状态，下游风力机前端位置的Λ约为整个风电场来流湍流积分长度的60%。在风电场上方约0.5 d_T以上高度的流场结构受风电场影响较小。

关键词：风电；风力机；尾流；湍流；积分长度尺度；风洞

中图分类号：TK83 **文献标志码**：A

0 引 言

作为一种清洁、可再生能源，风力发电在能源供应、环境保护和应对气候变化等方面发挥着越来越重要的作用[1]。风力发电机通常运行在长周期、高波动强度的复杂湍流环境中[2]，机组载荷和输出功率受高能相干流场运动的广泛影响，揭示流场湍流结构在风电场中的动力学特性对量化风力发电机荷载不稳定性和输出功率波动具有重要意义[3-4]。

许多学者提出了经典的湍流模型（冯·卡门模型等）来揭示湍流的结构特征[5-6]，平均流速、湍流强度和湍流积分长度尺度通常是其中最为重要的参数[7]。就风电场而言，风电场功率波动可通过流场的速度频谱和传递函数来预测[4]。近些年，基于风洞实验[8-11]、场地测量[12]和数值模拟[13-17]等研究手段，平均流速和湍流强度等特性获得了深入广泛的研究，而针对湍流积分长度的研究非常有限。最近，金亚庆等[18]分析了单个模型风力机尾流中大尺度湍流微团在2种不同湍流强度环境下的演变规律，发现尽管在近流场和远流场，湍流积分尺度在数值上都有差异，但在不同湍流强度下均随风力机下游距离近似幂次发展。Chamorro等[19]提出可用湍流积分长度来量化潮流能水轮机的尾流恢复情况，而且湍流积分长度的恢复速度和叶尖速比无关。刘惠文等[20]通过风洞实验发现机组排布间距的不同能影响湍流积分时间尺度的演变。Singh等[21]发现风力机旋转会破坏流场中大尺度湍流结构，促进小尺度湍流结构的生成，同时局部区域内各尺度湍流微团之间的能量交换发生衰减，减弱了流场的间歇性，可促进尾流场均质化演变。Blackmore等[22]模拟了不同来流工况下潮流能水轮机尾流演变，并指出当来流的积分尺度较大时，尾流恢复速度更快，展向区域更大。

尽管诸多研究已揭示了风力机周围的流场特征，但对风电场中大尺度湍流微团运动，特别是风电场中湍流积分长度演变的研究甚少。本文依托风洞实验，致力于量化风电场空气动力场中湍流积分长度发展和演变规律，以期为数值模拟提供重要的验证数据，同时为搭建风电场功率频谱特征模型补充重要参数信息，从而为风电场优化布置、机组控制及电网稳定运行提供理论基础。

1 实验设置与测量

实验在美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校可再生

收稿日期：2018-04-03

基金项目：中央高校基本科研业务费专项（2019B03514）；国家自然科学基金面上项目（51876054）；国家建设高水平大学公派研究生项目；美国科学基金（No.ECCS-041544081）；江苏高校优势学科建设工程（水利工程）

通信作者：刘惠文（1991—），男，博士、讲师，主要从事风电场空气动力学方面的研究。hwliu91@foxmail.com

能源与湍流环境组的艾菲尔型边界层风洞中进行。风洞测试段长 6.1 m，宽 0.91 m，高 0.46 m。测试段沿主流向的压力梯度可通过风洞天花板进行调整，实验期间压力梯度约为零[23]。

模型风力机叶片由三维打印 PolyJet Vero 系列刚性不透明材料制作而成，所用风力机是基于美国 Sandia 国家实验室研发的模型[24]。风力机模型直径 $d_T=120$ mm，轮毂高度 $z_{hub}=125$ mm。风力机负载电机采用 Precision Microdrives 公司的微型直流电机，额定输出功率 $P_0\approx1$ W，阻抗 $\tau_e=2$ [25]。模型风电场为 5×3 对齐式排列方式，流向间距 $S_x=\Delta x/d_T=10$，展向间距 $S_y=\Delta y/d_T=2.5$，最后一排及两侧行风力机是为了消除边界的影响而虚设的。在这个风电场布局中，轮毂高度的来流速度 $U_{hub}=9.33$ m/s，基于风力机直径的雷诺数为 $Re=U_{hub}d_T/\nu\approx7.5\times10^4$，叶尖速比 $\lambda\approx4.9$。

实验条件为高湍流环境，通过在风洞入口布置动态湍流发生器来增强湍流强度（图 1 远端）[18]，轮毂高度湍流强度为 $\sigma_u/U_{hub}\approx10.5\%$。在风洞测试段表面在流向每隔 200 毫米，沿展向铺设高度为 5 mm 的链条用于产生湍流边界层[26-27]，产生的边界层具有非常明显的对数区域，摩擦速度为 $u_*\approx0.55$ m/s，气动粗糙度长度为 $z_0\approx0.12$ mm，边界层厚度为 $\delta=0.3$ m。

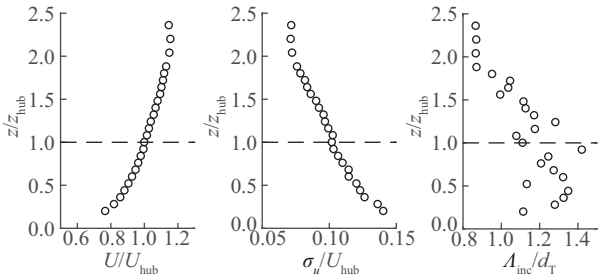


图1 风洞试验设置

Fig. 1 Experimental setup in wind tunnel

实验使用 DANTEC 公司的边界层型恒温热线测速仪测量不同位置的单点一维速度，通过 Velmex 二维位移仪移动热线测速仪的竖向和展向位置。在风电场中心列的竖直中心平面，$z=25$~315 mm 范围内，每隔 $\Delta z=10$ mm 采样 1 次；在轮毂高度的水平平面，同样每隔 $\Delta y=10$ mm 采样 1 次，测量区间 $y=-120$~120 mm。每次采样频率为 10 kHz，采样周期为 120 s。热线测速仪在实验开始阶段和结束阶段通过静态皮托管进行校准，以建立热线测速仪输出电压和风洞风速之间的关系。实验过程中，室内温度控制在 23±0.5 ℃，以避免电压信号的热漂移。

无量纲化的湍流边界层特性如图 2 所示。纵坐标数值基于风力机轮毂高度 z_{hub} 无量纲化，虚线即代表轮毂高度，图 2a 和图 2b 横坐标基于轮毂高度的平均来流速度 U_{hub} 无量纲化，图 2c 相对于转轮直径 d_T 无量纲化。



a.平均速度 b. 湍流强度 c. 积分长度

图2 湍流边界层特征

Fig. 2 Characteristics of turbulent boundary layer

实验的测量误差主要来源于：1）风洞风速控制电机的转速控制相对误差在 0.2%以内；2）皮托管校准而产生的相对误差在 0.1%以内；3）热线测速仪精度为 0.001 V，相对误差在 0.1%以内；4）环境温度改变造成的相对误差在 0.2%以内；5）位移仪机械移动、测量点人工标定和风力机模型布置等共同造成的测量点位置相对误差在 1%以内。综上，流场测量值的实际相对误差小于 2%。

2 结果与讨论

2.1 平均流速分布特性

图 3 为水平和竖直平面无量纲平均流速分布图。其中，图 3a 对比了在第 1、3 和 4 排中心列风力机旋转平面后 $x/d_T=1$、9 位置处平均流速水平面上的分布规律；图 3b 为相应位置在竖直平面上的分布（水平虚线代表叶尖位置）。可以看出，流体对风力机做功后，速度在风轮后方区域急剧衰减，尤其是在近尾流区（$x/d_T=1$）轮毂中轴线附近，速度损失约为 60%。随着位置向下游以及展向移动，外部流场高速流体逐渐渗入，并与低速尾流进行动量交换，促进尾流速度的恢复，在 $x/d_T=9$ 位置处，最大速度损失约为 15%。注意到，在虚线之间的风轮轮廓内，相比于第 1 排风力机尾流，第 3、4 排近尾流场的速度损失相对更大，但是下游风力机尾流速度恢复速率更快，因此在远流场上、下游风力机速度相差不大。下游风力机近尾流场速度损失较大归因于下游风力机的来流受上游风力机尾流速度衰减影响，来流速

度较小；而在远流场恢复较快，是由于上游风力机旋转产生的附加湍流可促进下游风力机尾流和外部流场的动量交换。而在风轮轮廓外，第 3、4 排和第 1 排流速差异较大，尤其是图 2b 所示的风电场上方，主要是因为受风电场内部边界层所致[8]。上、下游风力机尾流场之间的这种差异会随往风电场内部的深入而变小，在第 3 排之后，基本实现动态平衡。

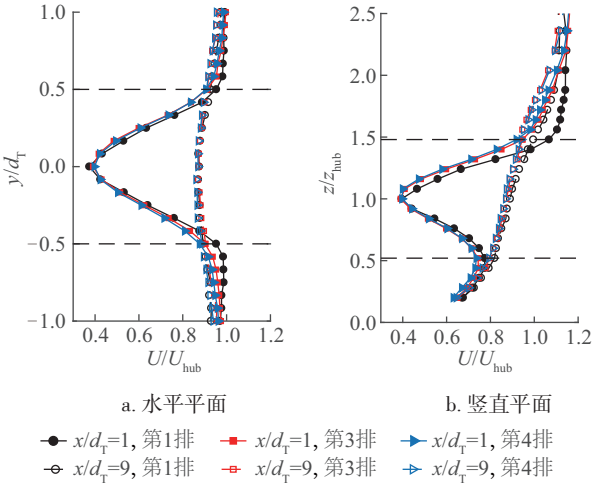


图3　无量纲平均流速分布图

Fig. 3　Distribution of normalized mean velocity

2.2　湍流强度分布特性

图 4 为水平和竖直平面上无量纲化湍流强度分布图。如前所述，下游风力机尾流的湍流强度相对上游风力机尾流较大，这种差异在第 3 排之后同样变得很小。湍流强度最大值出现风力机上部叶尖和左、右叶尖附近，这得益于叶尖涡和边界层的共同影响。由于受轮毂涡的影响，在第 1 排风力机近尾流区轮毂后方，同样可以观察到湍流强度的一个峰值，而由于上游风力机旋转而增强的湍流强度对轮毂涡的重要衰减作用，这个峰值在下游风力机近尾流场未出现。

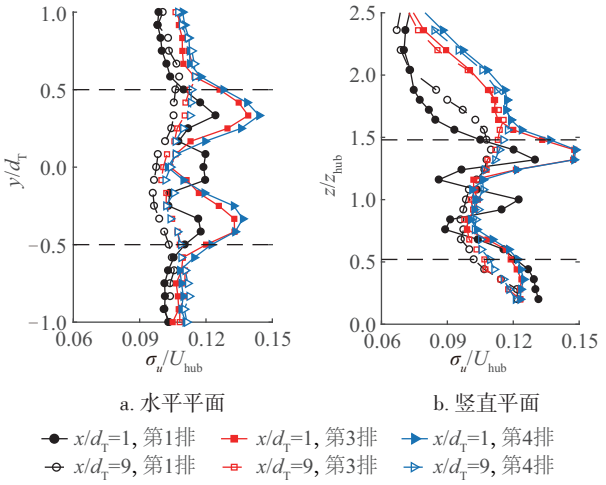


图4　无量纲湍流强度分布图

Fig. 4　Distribution of normalized turbulence intensity

2.3　湍流积分长度分布特性

湍流积分长度可在泰勒假设的基础上，由主流向速度的自相关函数积分计算[19]：

$$r(\tau)=\frac{\overline{u'(t)u'(t-\tau)}}{\sigma_u^2} \tag{1}$$

$$T\approx\int_0^{t_c}r(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

$$\Lambda\approx U_c T \tag{3}$$

式中，τ——时间间隔；u'——速度波动；σ_u^2——速度方差；t_c——$r(t_c)$ 第 1 次达到给定值 $r=r_0$ 的时间，这里给定 $r_0=0.05$，一方面是为了消除噪音，另一方面这个值在本实验的流场环境具有具体的物理意义，第 1 排风力机叶尖后湍流积分长度大小和风力机半径尺度一致[21]。

2.3.1　水平分布

风电场湍流积分长度在水平面上的无量纲分布云图如图 5 所示。不难看出，湍流积分长度在水平面上基

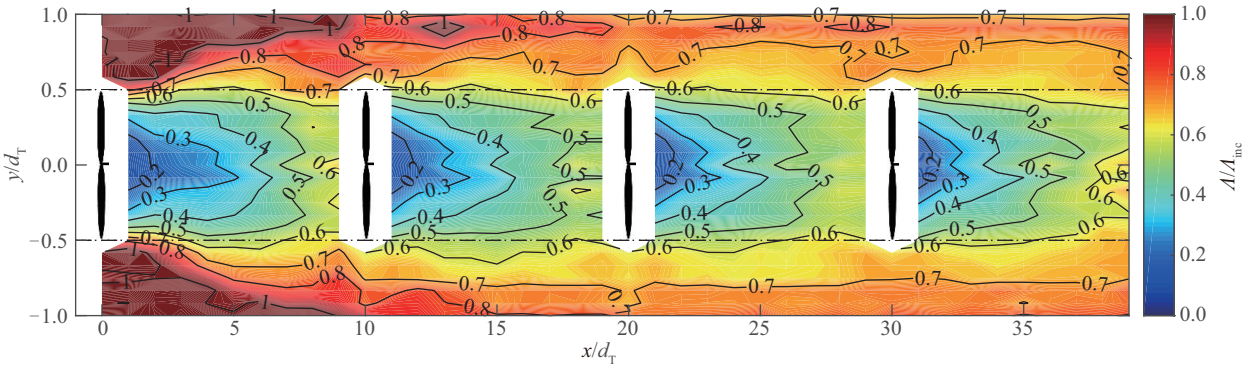


图5　水平面上无量纲湍流积分长度分布云图

Fig. 5　Contour of normalized integral length scale in horizontal plane

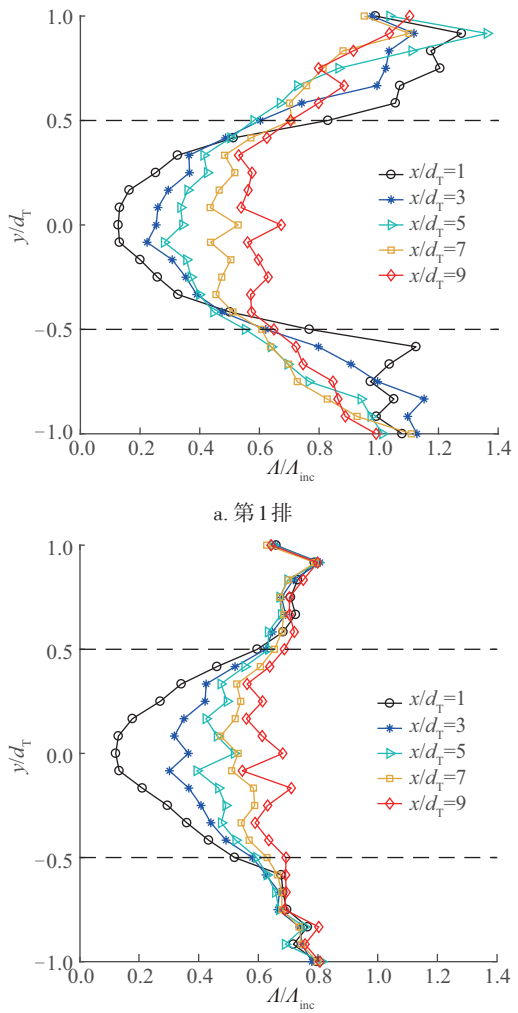
本关于中心线对称，当流体经过旋转的风力机时，大尺度的湍流结构受风力机剧烈扰动的破坏在风电场内部发生快速衰减而向下游位置移动，湍流积分长度逐渐恢复，到达下游风力机位置时，大小约为风电场来流湍流积分长度的60%。类似于风电场上方发展的内部边界层，湍流积分长度在风轮区外围也有衰减，因此在展向紧凑排布的风电场中，下游展向位置风力机的来流湍流积分长度相比整个风电场的来流较小。在第3排之后，湍流积分长度分布基本实现动态稳定。

为具体量化不同位置 Λ 的数值大小，图6分别补充了第1和第4排风力机尾流中 Λ 的水平分布曲线。可以看出，相比于平均流速等特性，湍流积分长度更能体现风电场流场湍流结构的非均匀性。而且，随着向风电场下游位置移动，风轮外围流场在不同主流向位置的差异明显减小。

2.3.2 竖直分布

图7为风电场湍流积分长度在竖直面上的无量纲分布云图。和其他流场性质相似(如平均流速)，受边界层剪切特性的影响，尾流中湍流积分长度的分布关于风轮中轴线呈现非对称性。明显地，大尺度的湍流结构受风力机剧烈的破坏在风电场内部发生快速衰减。由于内部边界层的发展，湍流积分长度在风电场上方近距离也有衰减，衰减影响在风电场上方高度约 $0.5d_T$ 以上可忽略。到达下游风力机位置处的 Λ 大小和水平面上一致。

图8为第1和第4排风力机尾流中的竖直分布曲线。和水平分布相似，下游风力机上方流场更具均匀性，主流向方向数值差别不大。



a. 第1排

b. 第4排

图6 水平面上无量纲湍流积分长度分布曲线

Fig. 6 Distribution curve of normalized integral length scale in horizontal plane

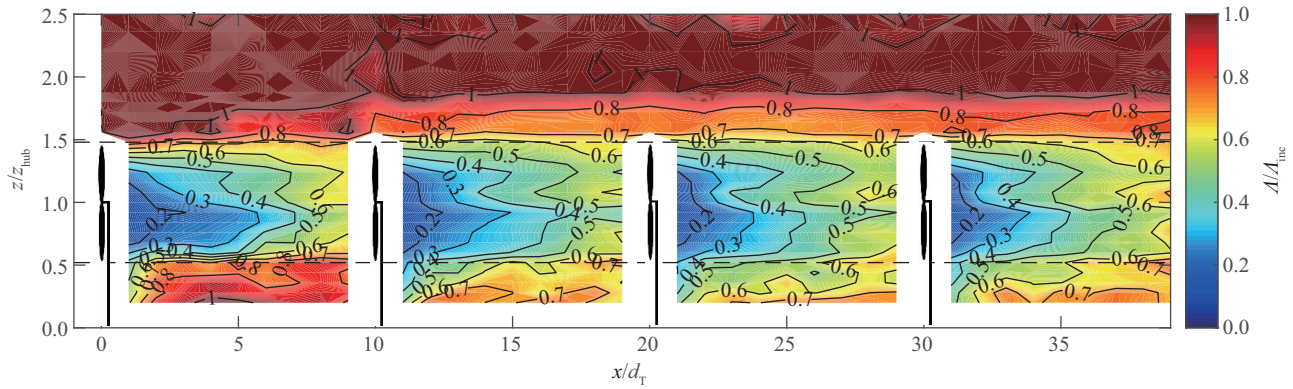
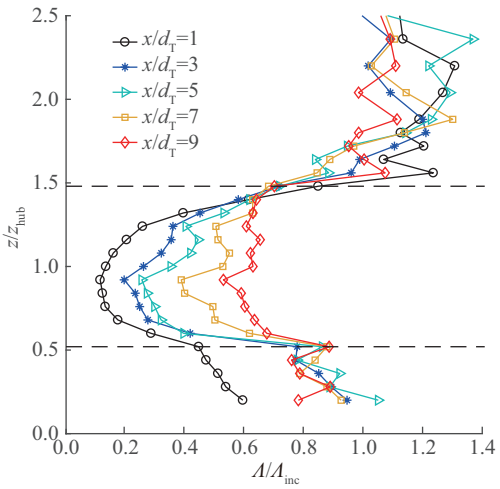
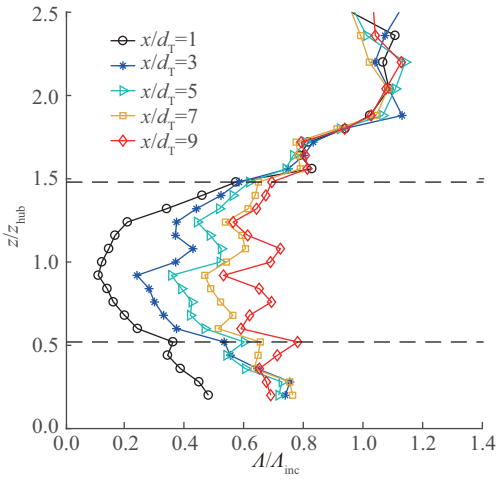


图7 竖直平面上无量纲湍流积分长度分布云图

Fig.7 Contour of normalized integral length scale in vertical plane



a. 第1排



b. 第4排

图8　竖直平面上无量纲湍流积分长度分布曲线

Fig. 8　Distribution curve of normalized integral length scale in vertical plane

3　结　论

风洞实验表明湍流积分长度在风电场内部出现剧烈衰减，也意味着大尺度的含能湍流结构的衰弱，随着向下游风力机位置移动，外部流场大尺度湍流微团逐渐进入尾流区，湍流积分长度逐渐恢复，到达下游风力机位置时，数值约为风电场来流的60%。受内部边界层发展的影响，在风轮区外围，湍流积分长度也发生衰减，从第3排风力机尾流开始，湍流积分长度和平均流速以及湍流强度一致，基本达到稳定平衡状态。在风电场水平平面，湍流积分长度基本关于风力机中心线对称；而在竖直平面，受大气边界层影响，湍流积分长度分布不具有对称性。与平均流速和湍流强度演变类似，湍流积分长度也可用于表征风电场流场的发展演变过程。掌握湍流积分长度在风电场中的分布规律对于分析风电场内部风力机周围的流场的频谱特性、风力机荷载波动以及风电场输出功率波动具有重要意义。

致　谢：感谢伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校 Leonardo P. Chamorro 教授对本实验场地的支持和方案设计的指导，以及感谢金亚庆博士和 Imran Hayat 等对数据采集的帮助。

［参考文献］

［1］ COUNCIL G W. Global wind report annual market update[R]. Brussels：GWEC，2016：1-10.

［2］ 李军，宋晓萍，程雪玲，等. 从天气尺度到风力机尺度大气运动的动力模拟[J]. 太阳能学报，2015，36(4)：806-811.
LI J，SONG X P，CHENG X L，et al. Dynamic simulation of wind flow from synopic scale to turbine scale[J]. Acta energire solaris sinica，2015，36(4)：806-811

［3］ VERMEER L J，SØRENSEN J N，CRESPO A. Wind turbine wake aerodynamics [J]. Progress in aerospace sciences，2003，39(6)：467-510.

［4］ LIU H W，JIN Y Q，TOBIN N，et al. Towards uncovering the structure of power fluctuations of wind farms[J]. Physical review，2017，96(6)：063117.

［5］ KAIMAL J，FINNIGAN J. Atmospheric boundary layer flows：their structure and measurement [M]. Oxford University Press，1994.

［6］ VON K T. Progress in the statistical theory of turbulence [J]. Proceedings of the national academy of sciences，1948，34(11)：530-539.

［7］ POPE S B. Turbulent flows [M]. London：Cambridge Press，2001.

［8］ CHAMORRO L P，PORTÉAGEL F. Turbulent flow inside and above a wind farm：a wind-tunnel study [J]. Energies，2011，4(11)：1916-1936.

［9］ MARKFORT C D，ZHANG W，PORTÉ- AGEL F. Turbulent flow and scalar transport through and over aligned and staggered wind farms [J]. Journal of turbulence，2012，13(1)：1-36.

［10］ 孙之骏，顾蕴松. 风机尾流的流场特性实验研究[J]. 太阳能学报，2015，36(10)：2474-2478.
SUN Z J，GU Y S. Experimental investigation of wake of wind turbine[J]. Acta energire solaris sinica，2015，36

(10): 2474-2478.

[11] NEWMAN J, LEBRON J, MENEVEAU C, et al. Streamwise development of the wind turbine boundary layer over a model wind turbine array[J]. Physics of fluids, 2013, 25(8): 085108.

[12] HONG J R, TOLOUI M, CHAMORRO L P, et al. Natural snowfall reveals large-scale flow structures in the wake of a 2.5 MW wind turbine[J]. Nature communications, 2014(5): 4216.

[13] LU H, PORTÉAGEL F. Large-eddy simulation of a very large wind farm in a stable atmospheric boundary layer[J]. Physics of fluids, 2011, 23(6): 065101.

[14] YANG D, MENEVEAU C, SHEN L. Large- eddy simulation of offshore wind farm[J]. Physics of fluids, 2014, 26(2): 46-53.

[15] 侯亚丽, 汪建文, 王强, 等. 基于大涡模拟的风力机尾流湍流特征的研究[J].太阳能学报, 2015, 36(8): 1818-1824.
HOU Y L, WANG J W, WANG Q, et al. Study on wake turbulence characteristics of wind turbine base on large eddy simulation[J]. Acta energire solaris sinica, 2015, 36(8): 1818-1824.

[16] 田琳琳, 赵宁, 钟伟. 风力机尾流相互干扰的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2012, 33(8): 1315-1320.
TIAN L L, ZHAO N, ZHONG W. Numerical simulation of wake interactions of wind turbines[J]. Acta energire solaris sinica, 2012, 33(8): 1315-1320.

[17] 张玲, 邹永, 黄鹏杰. 水平轴风力机多机组阵列的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1133-1138.
ZHANG L, ZHOU Y, HUANG P J. Numerical simulation of wind turbine with horizontal axis in multiple unit array[J]. Acta energire solaris sinica, 2016, 37(5): 1133-1138.

[18] JIN Y Q, LIU H W, AGGARWAL R, et al. Effects of freestream turbulence in a model wind turbine wake[J]. Energies, 2016, 9: 830.

[19] CHAMORRO L P, HILL C, MORTON S, et al. On the interaction between a turbulent open channel flow and an axial-flow turbine[J]. Journal of fluid mechanics, 2013, 716: 658-670.

[20] LIU H W, HAYAT I, JIN Y Q, et al. On the evolution of the integral time scale within wind farms[J]. Energies, 2018, 11: 93.

[21] SINGH A, HOWARD K B, GUALA M. On the homogenization of turbulent flow structures in the wake of a model wind turbine[J]. Physics of fluids, 2014, 26(2): 1164-2728.

[22] BLACKMORE T, BATTEN W, BAHAJ A. Influence of turbulence on the wake of a marine current turbine simulator[J]. Proceedings of the Royal Society A-mathematical physical and engineering sciences, 2014, 470(2170): 201400331.

[23] ADRIAN R J, MEINHART C D, TOMKINS C D. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer[J]. Journal of fluid mechanics, 2000, 422: 1-54.

[24] JOHNSON E, FONTAINE A A, JONSON M L, et al. A 1: 8.7 scale water tunnel test of an axial flow water turbine [C]//Proceedings of the First (2013) Marine Energy Technology Symposium, Washington DC, USA, 2013.

[25] TOBIN N, HAMED A, CHAMORRO L P. An experimental study on the effects of winglets on the wake and performance of a model wind turbine[J]. Energies, 2015, 8(10): 11955-11972.

[26] CHAMORRO L P, PORTÉ- AGEL F. A wind- tunnel investigation of wind- turbine wakes: boundary- layer turbulence effects[J]. Boundary-layer meteorology, 2009, 132(1): 129-149.

[27] 刘惠文, 郑源, 杨春霞, 等. 剪切来流条件下风力机尾流场特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6987-6993, 7132.
LIU H W, ZHENG Y, YANG C X, et al. An experimental investigation on the characteristics of wind turbine wake under incoming shear flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6987-6993, 7132.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EVOLUTION OF INTEGRAL LENGTH SCALE WITHIN WIND FARM

Liu Huiwen[1], Zheng Yuan[1-3], Zhang Yuquan[1], Yang Chunxia[1], Fu Shifeng[3], Zhang Buen[3]

(1. *College of Energy and Electric Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 211100, *China*;
2. *Institute of Innovation*, *Hohai University*, *Nanjing* 210024, *China*;
3. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210024, *China*)

Abstract: Wind tunnel experiments were performed to investigate the evolution of the integral length scale (Λ) in an aligned model wind farm with stream-wise turbine spacing of 10 rotor diameters (d_T) by span-wise spacing of $2.5d_T$, resulting in an array of 5×3 horizontal-axis turbines. Hotwire anemometry was used to obtain high-resolution measurements of stream-wise velocity fluctuations at various locations. Results suggest that the distribution of Λ is almost symmetric in the horizontal plane while not in the vertical plane due to the boundary layer effect. Λ is highly dampened by the rotating turbines and recovers with distance downwind, as large-scale motions from the outer flow gradually enter the wakes. In particular, Λ appears to reach adjusted value starting from the fifth row of turbines in the wind farm. There, the flow impinging the turbines exhibited $\Lambda/\Lambda_{inc} \approx 60\%$. Also, the undisturbed levels of Λ above the wind farm are recovered only at $0.5d_T$ above the top tips.

Keywords: wind power; wind turbines; wakes; turbulence; integral length scale; wind tunnels