

# 水平轴风力机尾迹叶尖涡运动轨迹的实验研究

东雪青<sup>1,2</sup>, 刘 钊<sup>1</sup>, 汪建文<sup>1,2</sup>, 章书成<sup>1,2</sup>, 韩玉霞<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古工业大学风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010051)

**摘 要:** 利用高频PIV系统采集水平轴风力机下游远至4.5倍风轮直径范围内的尾流数据。首先通过对涡量场云图分析发现叶尖涡“交互跳跃”现象;然后对比不同翼型、风速、尖速比下,1、2、3、4倍风轮直径处的平均涡量值发现:随着尖速比的增加,叶尖涡“交互跳跃”现象提前发生;随着风速的增加,叶尖涡“交互跳跃”现象推后发生;得出叶尖涡“交互跳跃”现象的出现是尾流速度开始恢复的标志。而NACA4415翼型叶片发生叶尖涡“交互跳跃”现象的时间比S翼型叶片推迟,所以NACA4415翼型叶片的尾流速度恢复比S翼型叶片推迟。

**关键词:** 高频PIV; 水平轴风力机; 叶尖涡; 交互跳跃; 尾流速度恢复

**中图分类号:** TK89

**文献标识码:** A

## 0 引 言

风能是一种可再生能源,其对环境无污染又蕴含庞大的能量,在全球许多地域的储存量巨大且用之不竭,得到世界各国的认同。风力发电已成为新能源技术中最成熟、最具商业化价值、最有经济性的发电方式之一<sup>[1-3]</sup>。在过去10年中,全球风电装机总容量平均年增长率达到16.19%<sup>[4]</sup>,在国家的高度重视下,中国风力机技术研究也取得了较大发展,尤其在空气动力学、结构动力学、材料力学以及微气象学等领域进步显著<sup>[5]</sup>。

气流通过旋转的风轮时产生动量损失,会在风轮转子下游形成风速下降的局部粘性区域,该区域被称为尾迹<sup>[6]</sup>。根据Kutta-Joukowski法则,使得叶片的迎风面与背风面产生压力差,并使整只叶片上产生升力。在叶片叶尖位置,由于迎风面和背风面的压力差导致叶尖涡的产生<sup>[7]</sup>。叶尖涡的存在导致尾流近尾迹区域内气流扰动剧烈,湍流度较高,造成尾流风速小于来流风速。对风电场而言,上游风速减小使下游风力机的输出功率减小,尾迹附加的强湍流会影响下游风力机的疲劳载荷、使用寿命和结构性能,进而影响整个风电场的

效能<sup>[8]</sup>。因此,有关叶尖涡在尾迹中的运动轨迹的研究对改善风力机发电效能至关重要。本文通过对2种翼型叶片模型的叶尖涡运动轨迹的分析研究,以期推广到实际风力机中。

## 1 实验设备及方案

### 1.1 实验风洞

本实验在内蒙古工业大学的B1/K2低速风洞闭口段进行。风洞全长24.59 m。闭口实验段:横截面为0.92 m×0.92 m的正方形,最大风速可达60 m/s,实验段湍流度 $\epsilon \leq 5\%$ 。

### 1.2 风力机模型

该风力机模型为两叶片型水平轴风力机,以S翼型<sup>[9]</sup>和NACA4415翼型2种原型进行对比。S翼型是笔者课题组最新研发的翼型(翼型相关几何参数暂不公布),NACA4415翼型的最大相对弯度为4%;最大弯度的相对位置 $f_x$ 为40%;最大相对厚度 $t$ 为15%,2种翼型在不同测试风速下的最大输出功率如表1所示。2种风力机模型旋转直径为300 mm,塔架高度为450 mm。风力机模型如图1所示。

收稿日期: 2016-09-26

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2015MS0508); 国家自然科学基金(51366010)

通信作者: 韩玉霞(1979—),女,博士研究生,主要从事风力机尾迹流场方面的研究。673261562@qq.com

表1 2个风轮在不同测试风速下最大输出功率

Table 1 Maximum power output of two wind wheels under different testing wind velocity

风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	最大输出功率/W		相对提升率/%
	NACA4415	S翼型	
4	20.3	21.0	3.4
5	41.4	42.8	3.4
6	76.8	79.5	3.5
7	126.9	138.0	8.7
8	186.9	198.8	6.4
9	262.1	279.3	6.6
10	362.7	396.6	9.3



a. S翼型



b. NACA4415翼型

图1 风力机模型

Fig. 1 Model of wind turbine

### 1.3 高频PIV系统

本实验采用高频PIV系统进行测试,利用ND:YLF LDY 300高重复率激光器,最大输出功率为150 W,脉宽为100 ns;型号为High Speed Star 8的高灵敏度、兆像素分辨率数码相机。采样频率为10 kHz。

### 1.4 实验方案

实验系统的整体布置如图2所示。为拍摄全尾迹流场,考虑到实际条件的限制及闭口实验段空气流动稳定,闭口段的风速基本一致,所以采用相机固定不动,移动风力机组的方案。如图3所示,每隔150毫米移动1个轴向位置,共移动1#~9#这9个轴向位置,即9个拍摄窗口。拍摄窗口尺寸为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ ,重叠域宽为50 mm,重叠率为20%。



1. 激光器电源 2. 激光器 3. CCD相机 4. 测试窗口 5. 同步器

图2 实验布置图

Fig. 2 Arrangement diagram of experiment facilities

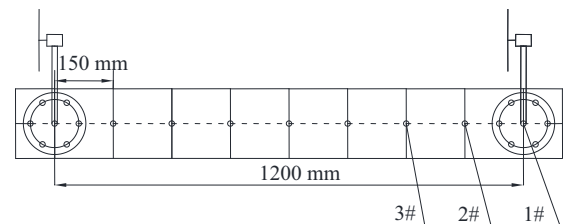


图3 风力机移动轴向图(mm)

Fig. 3 Axial displacement of model of wind turbine (mm)

固定风力机偏航角为 $0^\circ$ ,定义经过叶尖前缘点与风轮旋转中心的连线并且垂直于地面的平面为 $0^\circ$ 方位面。在每个轴向位置处,从 $0^\circ$ 方位面开始无触发拍摄,选定的来流风速为10、12、14 m/s,尖速比 $\lambda$ 为4、5、6。考虑到拍摄效果最佳,采样频率定为1000 Hz,计算不同工况下的风轮旋转速度。为了满足最大转速时拍摄样本的数量足够,拍摄样本数量定为1000张,每一工况采集3次。

## 2 实验结果分析

### 2.1 叶尖涡运动轨迹分析

空气流经旋转的风轮时,在风轮后面会形成压力面和吸力面,由于压差的作用,在叶片叶尖位置会产生叶尖涡向尾迹下游传递,在叶片叶根处会产生叶根涡(即中心涡),形成叶尖涡和中心涡2个区域。众所周知,叶尖涡核绕自身的旋转方向与风轮的旋转方向相反,形成的运动轨迹是沿着尾迹向下游传递的,径向方向上逐渐向外扩散的螺旋状的运动轨迹。如果在尾迹区域中切出1个二维平面进行观察,则会发现叶尖涡的运动轨迹是随着向尾迹下游传递的,径向方向上逐渐向外扩散,也就是径向坐标会逐渐增大。但是,本次远尾迹实验发现叶尖涡的运动轨迹并非如此,而是另有不同的运

动轨迹。

提取 NACA4415 翼型工况为来流风速  $V=10\text{ m/s}$ 、尖速比  $\lambda=4, 5, 6$ ，轴向位置为  $1^\#\sim 9^\#$  处的涡量场云图( $0^\circ$ 方位面)。为了得到完整的流场信息,利用 Tecplot 软件对涡量场云图进行拼接,如图 4 所示。

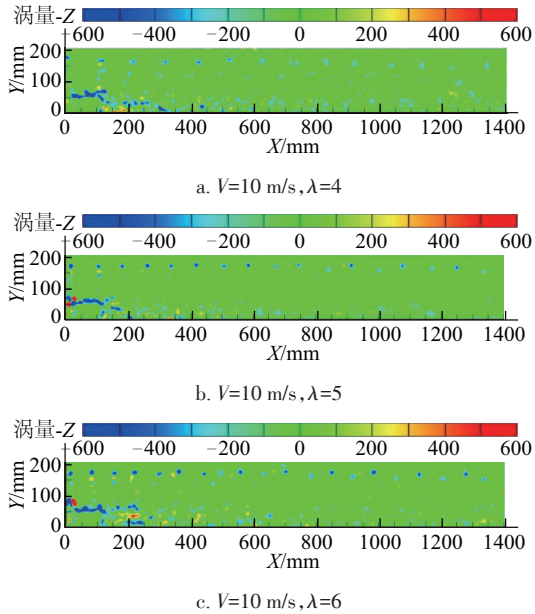


图 4 不同尖速比下涡量云图

Fig. 4 Contour of vorticity value in various tip speed ratio

从图 4 中可清晰观察到叶尖涡的运动变化情况。在近尾迹区域内,叶尖涡的运动轨迹近似于一条直线。在图 4b 和图 4c 中,随着轴向距离的增加,由于涡的动能(拟涡能,也称为涡旋拟能,在二维流场中,由于拟涡能的耗散总是大于零,因此平面流动的拟涡能是衰减的<sup>[10]</sup>)受到流场的粘性力作用而逐渐消耗,2 只叶片产生的叶尖涡的运动轨迹由原先的等距离螺旋线而逐渐失稳,在径向方向上开始出现差距,即出现上下错位的“交错现象”,称之为叶尖涡“交互跳跃”现象。在图 4a 中,该现象几乎未出现。在图 4b 和图 4c 中,分别在  $X=600$  和  $800\text{ mm}$ ,叶尖涡的径向距离开始增加,即出现叶尖涡“交互跳跃”现象,并且随着尖速比的增大,推测叶尖涡“交互跳跃”现象会提前出现。

提取 NACA4415 翼型工况为来流风速  $V=12\text{ m/s}$ 、尖速比  $\lambda=6$ ，轴向位置为  $1^\#\sim 9^\#$  处的涡量场云图( $0^\circ$ 方位面)并用 Tecplot 软件进行涡量场拼接得到完整的流场信息,如图 5 所示。将图 5 与图 4c 进行比

较,发现直到  $X=1000\text{ mm}$ ,2 只叶片产生的叶尖涡的径向距离才开始有明显的增加,说明在相同尖速比下,随着风速的增大,叶尖涡“交互跳跃”现象的出现会推迟。

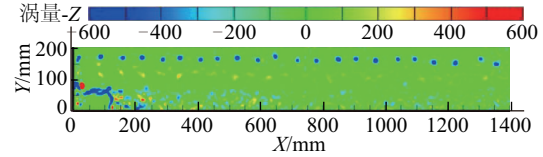


图 5 涡量场对应的流场图  $V=12\text{ m/s}$ ,  $\lambda=6$

Fig. 5 Contour of vorticity value in  $V=12\text{ m/s}$ ,  $\lambda=6$

## 2.2 涡量对比分析

为了比较 2 种翼型的涡量变化情况,提取 2 种翼型的叶片工况为来流风速  $V=10\text{ m/s}$ 、尖速比  $\lambda=5$ ，轴向位置为  $1^\#\sim 9^\#$  处的平均涡量场云图(对 1000 张涡量场云图取平均),然后通过平均涡量场云图提取出轴向位置为 1、2、3、4 倍风轮直径处的平均涡量值数据作曲线图,如图 6 所示。

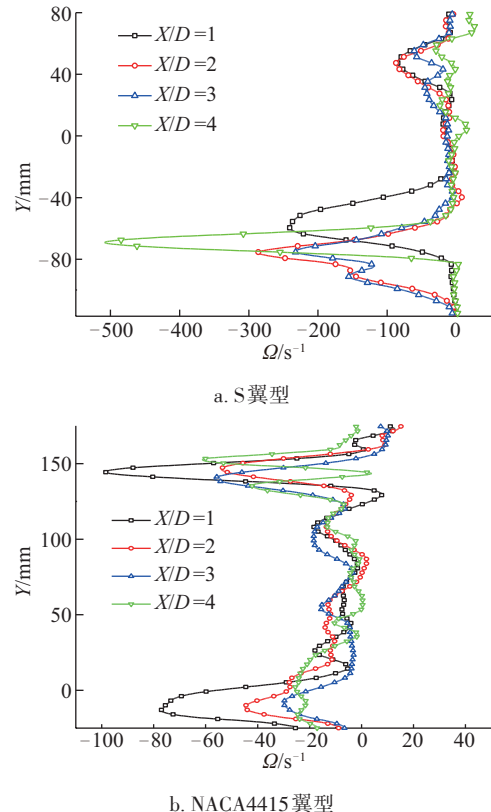


图 6 不同翼型、轴向位置处的涡量变化

Fig. 6 Vorticity value in different axial position and different airfoil profile

对比 2 种不同翼型的风力机,对于同一轴向位置处的涡量曲线,叶尖涡和中心涡的涡量明显大于其他位置,曲线在叶尖涡和中心涡区域形成明显的单峰状突起。可见,叶尖涡和中心涡区域空气的旋转程度比其他位置强烈,尾流速度衰减的更多。

观察 S 翼型的涡量曲线  $X/D=3$ , 在叶尖涡区域单峰状的曲线中间发生“凹陷”, 出现 2 个凸起, 在径向方向出现上下不太对称的涡量值, 形成一个“M”形状, 可见从 3 倍风轮直径开始, 出现明显的叶尖涡“交互跳跃”现象。而由于翼型形状的原因, NACA 翼型的曲线在  $X/D=3$  处并未出现明显的叶尖涡“交互跳跃”现象, 直到  $X/D=4$  处才开始出现。这说明翼型的不同影响该现象的出现时间, NACA 翼型比 S 翼型出现叶尖涡“交互跳跃”现象的时间推迟。但无论是哪种翼型的叶片, 叶尖涡“交互跳跃”现象必然会出现, 该现象具有普遍性。

对比 2 种翼型曲线图中不同的轴向位置, S 翼型中  $X/D=1, 2$  的叶尖涡涡量值变化不大, 从  $X/D=3$  开始, 叶尖涡涡量开始减少,  $X/D=4$  处更明显减少, 说明叶尖涡开始耗散, 尾迹流场与外部主流区发生掺混, 尾迹开始恢复。而 NACA4415 翼型则有所不同,  $X/D=1$  处叶尖涡涡量最大, 2、3、4 倍处叶尖涡涡量较小但相差不大, 在  $X/D=4$  处发生叶尖涡“交互跳跃”现象后, 叶尖涡涡量未明显减少, 速度亏损将持续下去。因此叶尖涡“交互跳跃”现象的出现可作为尾迹流场中近尾迹区域与过渡区域的分隔标志, 即尾流恢复的标志。所谓尾流恢复包含 2 个方面: 1) 速度的恢复, 当风经过旋转的风轮时, 由于能量的损失, 风速在风轮近尾迹附近会减少, 随着尾迹向下游发展, 尾迹外部的主流区流体与尾迹区流体逐渐掺混, 尾流速度也逐渐恢复到来流风速; 2) 湍流强度的恢复, 同样是风经过风轮后, 在风轮下游会造成一个高湍流区域, 随着尾迹向下游发展, 湍流结构逐渐耗散, 尾流区域的湍流强度逐渐恢复到来流流体的大小。但翼型的不同也会影响尾流恢复的位置。对比以上 2 种翼型, NACA4415 翼型叶片的尾流恢复得显然比 S 翼型叶片晚一些。

提取工况为来流风速  $V=10$  m/s、尖速比  $\lambda=4$  和  $\lambda=6$ , 轴向位置为 1、2、3、4 倍风轮直径处的平均涡量值数据作曲线图, 如图 7 所示。

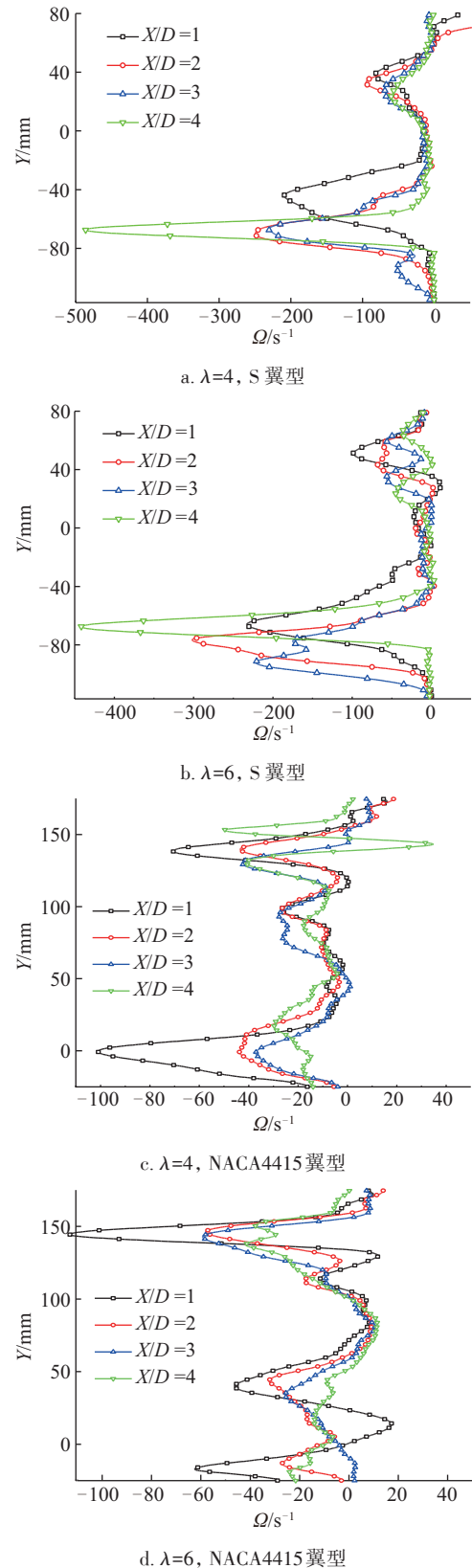


图7 不同翼型、尖速比、轴向位置处的涡量变化

Fig. 7 Vorticity value in different airfoil, tip speed ratio and axial position



观察 S 翼型的涡量曲线图,发现当  $\lambda = 4$  时,一直到  $X/D = 4$  处叶尖涡“交互跳跃”现象均未明显出现,比  $\lambda = 5$  时推后;而  $\lambda = 6$  时,曲线  $X/D = 2$  已在叶尖涡区域开始出现径向方向上下对称的涡量值,可见从 2 倍风轮直径开始,叶尖涡“交互跳跃”现象就开始出现,比  $\lambda = 5$  时提前。而观察 NACA4415 翼型的涡量曲线图,直到  $\lambda = 6$  时,  $X/D = 3$  处出现不明显的叶尖涡“交互跳跃”现象。2 种翼型的结果均说明,随着尖速比的增大,叶尖涡旋转运动速度有所增大,叶尖涡“交互跳跃”现象会提前发生,叶尖涡涡量提前减少,尾迹流场得以提前恢复。同时再次证明由于翼型的不同, NACA4415 翼型的叶片出现叶尖涡“交互跳跃”现象的位置比 S 翼型的叶片推迟。在相同风速下,对比同一轴向位置处的涡量值, S 翼型的叶尖涡涡量值随尖速比的增大而减少,但减少趋势不明显,而 NACA4415 翼型的叶尖涡涡量值则随尖速比的增大而增加,趋势较为明显。可见尖速比的变化对不同翼型的叶尖涡涡量的变化有所不同,同时也影响尾流恢复的位置。

提取 2 种翼型工况为来流风速  $V = 10 \text{ m/s}$ 、 $12 \text{ m/s}$ 、尖速比  $\lambda = 5$ 、轴向位置为 1、2、3、4 倍风轮直径处的平均涡量值数据作曲线图,如图 8 所示。与图 8a 相比,图 8b 在曲线  $X/D = 4$  处,叶尖涡区域才开始在径向方向出现上下对称的涡量值,可见从 4 倍风轮直径开始,叶尖涡“交互跳跃”现象开始逐渐明显,比工况  $V = 10 \text{ m/s}$  时推后;观察图 8c 与图 8d 发现,曲线  $X/D = 4$  在叶尖涡区域,涡量值曲线均出现“凹陷”,但与图 8c 相比,图 8d 中“M”形状并非特别明显,可见同样从 4 倍风轮直径开始,叶尖涡“交互跳跃”现象开始明显。对比工况  $V = 10 \text{ m/s}$ 、 $V = 12 \text{ m/s}$  的叶尖涡“交互跳跃”现象仍推后出现。2 种翼型的涡量值曲线对比说明,随着来流风速的增大,叶尖涡“交互跳跃”现象会推后发生,速度亏损区的持续范围就越长,尾流恢复的位置也就越远。

在相同尖速比下,对比同一轴向位置处的叶尖涡涡量,随着风速的增大, S 翼型的涡量值明显增加; NACA4415 翼型的涡量值明显减少,说明风速的变化也会影响不同翼型的涡量值变化,进而影响尾流恢复的快慢。

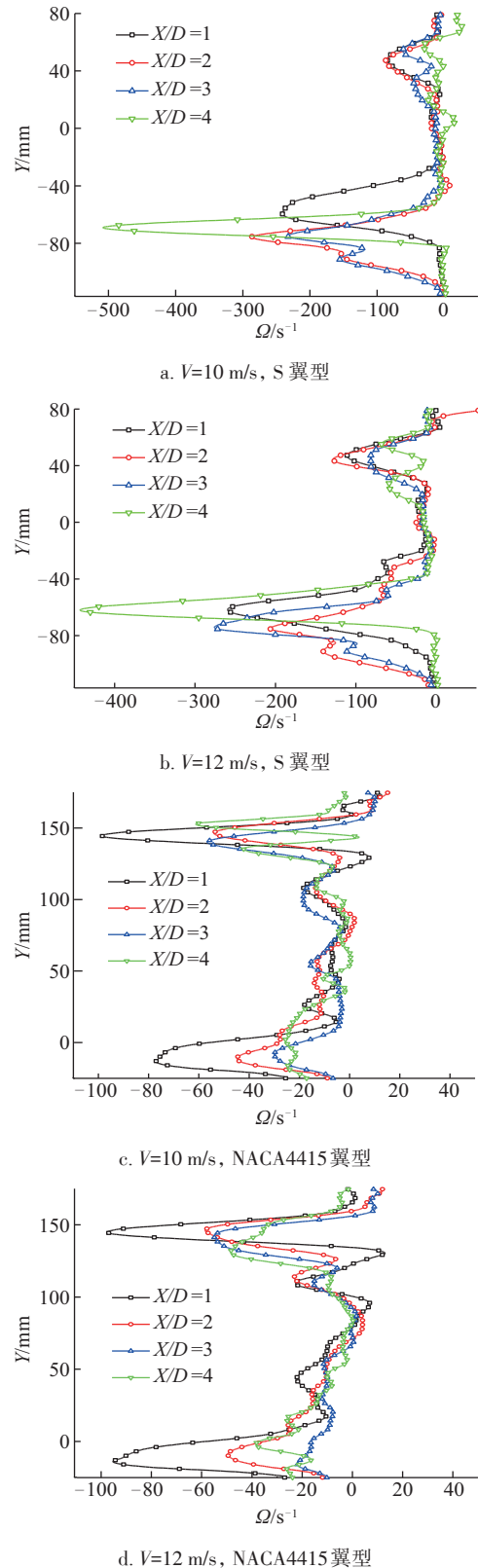


图 8 不同翼型、风速、轴向位置处的涡量变化

Fig. 8 Vorticity value in different airfoil, wind velocity and axial position

### 3 结 论

1)当叶尖涡向下游发展过程中,2只叶片产生的一对叶尖涡的运动轨迹由初始的等间距螺旋线而逐渐失稳,变得不再相互平行,出现了叶尖涡“交替跳跃”现象。

2)叶尖涡“交互跳跃”现象的出现可作为尾迹流场中近尾迹区域与过渡区域的分隔标志,即尾流恢复的标志。

3)随着尖速比的增大,叶尖涡“交互跳跃”现象会提前发生。

4)随着来流风速的增大,叶尖涡“交互跳跃”现象会推后发生。

5)NACA4415翼型的叶片出现叶尖涡“交互跳跃”现象的位置比S翼型的叶片推迟,因此尾流恢复的位置也相应推后。

#### [参考文献]

- [1] 鲁南. 新能源概论[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [1] Lu Nan. Introduction to new energy[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [2] 张希良, 汪婧, 顾树华. 利用清洁发展机制促进我国风力发电产业的发展[A]. 2003年中国太阳能学会学术年会[C], 上海, 2003.
- [2] Zhang Xiliang, Wang Jing, Gu Shuhua. Using clean development mechanism to promote the development of wind power industry in China[A]. China Solar Energy Society Academic Annual Meeting[C], Shanghai, 2003.
- [3] 吕靖峰. 我国风能产业发展及政策研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2013.
- [3] Lyu Jingfeng. Development and policy research on wind energy industry[D]. Beijing: Central University for Nationalities, 2013.
- [4] 李俊峰, 蔡丰波, 乔黎明, 等. 2014中国风电发展报告[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [4] Li Junfeng, Cai Fengbo, Qiao Liming, et al. 2014 China wind power review and report [R]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
- [5] Herbert G M J, Iniyan S, Sreevalsan E, et al. A review of wind energy technologies[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6): 1117—1145.
- [6] 胡丹梅, 欧阳华, 杜朝辉. 水平轴风力机尾迹流场试验[J]. 太阳能学报, 2006, 27(6): 606—612.
- [6] Hu Danmei, Ouyang Hua, Du Chao Hua. PIV experimental study on the wake flow of horizontal axis wind turbine model[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(6): 606—612.
- [7] Haans W, Sant T, Van K, et al. Measurement of tip vortex paths in the wake of a HAWT under yawed flow conditions[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(4): 456—463.
- [8] 杨瑞, 王小丽, 王强, 等. 不同布置方案风力机尾流及相互作用的实验研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2016, 35(3): 80—88.
- [8] Yang Rui, Wang Xiaoli, Wang Qiang, et al. Experimental study of wind turbine wake and the interaction in different layout scheme[J]. Journal of Xihua University: Natural Science, 2016, 35(3): 80—88.
- [9] 马剑龙, 汪建文, 刘雄飞, 等. 某新翼型风力机叶片的设计与气动性能试验[J]. 可再生能源, 2013, 31(9): 63—68.
- [9] Ma Jianlong, Wang Jianwen, Liu Xiongfei, et al. Research on design of wind turbine blade with new airfoil and test of its aerodynamic performance[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(9): 63—68.
- [10] 张兆顺. 湍流[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [10] Zhang Zhaoshun. Turbulent [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

## EXPERIMENTAL STUDY ON TRAJECTORY OF TIPVORTEX IN WAKE OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE WAKE

Dong Xueqing<sup>1,2</sup>, Liu Zhao<sup>1</sup>, Wang Jianwen<sup>1,2</sup>, Zhang Shucheng<sup>1,2</sup>, Han Yuxia<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China;

2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Technology Ministry of Education, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

**Abstract:** The wake data of 4.5 times of the wind wheel of the horizontal axis wind turbine were collected by utilizing the TR-PIV. The “leapfrogging phenomenon” of the tip vortex was discovered; Then by comparing the average vorticity value in 1, 2, 3, 4 times the diameter of the wind wheel position under various airfoil, wind velocity and tip speed ratio, the founding is that with the increase of the tip speed ratio, The “leapfrogging phenomenon” of the tip vortex will take place in advance; With the increase of the wind velocity, The “leapfrogging phenomenon” of the tip vortex pushes back, and get the conclusion that the “leapfrogging phenomenon” of the tip vortex is the sign of the recovery of the wake velocity. The position that the “leapfrogging phenomenon” of the tip vortex of the airfoil of NACA4415 happens later than the airfoil of S, so the recovery of the wake velocity of the airfoil of NACA4415 is also later than the airfoil of S.

**Keywords:** TR-PIV; horizontal axis wind turbine; tip vortex; leapfrogging; wake recovery