

# 风力机弯曲叶片附面层流动转捩和分离实验\*

宋力 苏猛 王睿哲 林丽华 田瑞

(内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051)

**摘要:**以柔性叶片能量转换装置为研究对象,在风洞闭口实验段,应用 PIV 技术测试弯曲叶片附面层速度场,通过速度场分析,得到弯曲叶片几何结构对附面层的流动分离和旋涡运动的规律。叶片的弯曲变形可以减少前层叶片吸力面附面层内的低能流体向空间扩散的范围,因此有助于减少附面层附近因流动分离而产生的升力损失;但对于后层叶片吸力面,由叶片弯曲带来的动态失速涡范围扩大会加剧流场的不稳定性。通过弯曲叶片流场 PIV 实验,可以指导柔性叶片的选材和设计,为提高叶轮的的能量转换效率和运行稳定性提供可靠的实验依据。

**关键词:**风力机 弯曲叶片 附面层 流动分离 弯度

**中图分类号:**TK83 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2014)01-0162-06

## 引言

当前使用的能源转化系统中,风力机叶轮是非常普遍同时又是非常关键的机构。采用高效率的叶轮能够大大降低能源转化利用过程中的损失,叶轮内部流动是一种极其复杂的多因素共同作用的流动,叶片的几何形状和流体粘性的作用使得流动具有很强的三维性和有旋性,叶片在非设计状态下有可能出现大范围的分离失速,损失急剧增大<sup>[1-3]</sup>。

风力机叶轮中遇到的涡层是从叶片表面产生出来的,它们分为2种形态:紧贴叶片表面的附着涡层即附面层,以及离开叶片表面伸到流体内部的自由涡层。从附着涡层到自由涡层的转化就是流动分离,转化后形成的流动包括自由涡层及其绕卷、自由涡层再附于物面形成的闭合回流等,统称为分离流<sup>[4]</sup>。风力机叶片在大迎角情况下,由于空气粘性作用,吸力面气流的速度减小,而逆压梯度不断增加,使得吸力面附面层流动无法克制逆压梯度,发生倒流或者逆流,流体在吸力面发生分离,由此引起升力迅速减小,阻力骤然增加;同时,分离流具有不稳定性,周期性地产生分离涡,因此会引起叶片振动<sup>[5]</sup>。控制边界层分离最直接的方法是减小来流和壁面的速度差,合理的翼型外形结构可以使流动保持为层流,进而推迟转捩<sup>[6-11]</sup>。Abdullah<sup>[12]</sup>采用形状记忆合金技术,对翼型外形进行自适应优化设计,翼型的弯度由形状记忆合金激励器来控制,通过

风洞实验研究激励器开合状态下翼型升阻比的变化,结果表明,表面 ABS 材料和内部形状合金的结构可以达到改变翼型的效果,通过改变翼型弯度能够增大叶片的升阻比。

本文研究的柔性叶片能量转换装置中,柔性叶片的基本结构如图1所示。叶片采用柔性材料制

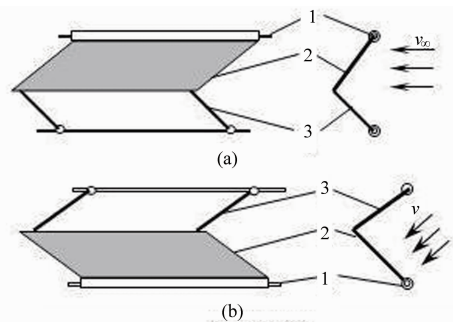


图1 柔性叶片结构简图

Fig. 1 Structure of flexible blade

(a) 前层叶片 (b) 后层叶片

1. 固定轴 2. 柔性叶片 3. 束缚部件

成,叶片一端通过固定轴和链条固定,另一端通过柔性束缚件与相邻叶片的固定轴固定,叶片可绕固定轴转动。当气流经过叶片时,柔性叶片受力发生弯曲变形,弯度会影响叶片附面层流动转捩与分离的位置和尺度。本文通过实验获取不同弯度翼型在不同气动条件时附面层流场结构,寻找弯曲叶片几何结构对附面层流动分离和旋涡运动的规律,进而指导柔性叶片的选材和设计,通过叶片的弯曲变形有

收稿日期:2013-05-27 修回日期:2013-09-17

\* 内蒙古自然科学基金面上资助项目(2011MS0708)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20111514110004)

作者简介:宋力,副教授,主要从事动力机械及风能利用技术研究,E-mail:sl1006@126.com

通讯作者:田瑞,教授,博士生导师,主要从事流体力学及新能源利用技术研究,E-mail:tianr@imut.edu.cn

效地控制翼型表面的流动分离和提高升力系数,为 提高叶轮的 能量转换效率和运行稳定性提供可靠的 实验依据。

## 1 弯曲叶片附面层流场测试实验

### 1.1 实验模型

通过相机对柔性叶片受风弯曲变形程度的记录,发现叶片的变形接近弧形,所以在文中用弧形曲率  $K$  来定义叶片的弯度。制作了 5 种不同弯度的弯曲叶片,如图 2 所示。

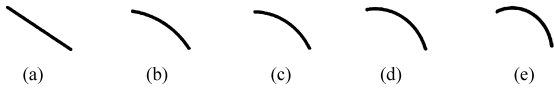


图 2 5 种叶片模型

Fig. 2 Models of five blades

(a)  $K=0$  (b)  $K=0.009$  (c)  $K=0.013$

(d)  $K=0.017$  (e)  $K=0.026$

### 1.2 测试方案

实验在内蒙古工业大学低速风洞实验室进行,该实验室拥有的 B1/K2 工业风洞,是一座具有串置双实验段的全钢结构开口吹气式低速风洞,适宜于建筑结构模拟和风力机等 的实验研究。第一实验段为闭口段,长 2.5 m,宽 0.9 m,高 0.9 m,风速范围 0~60 m/s,风速连续可调,闭口实验段湍流度  $\varepsilon \leq 0.005$ 。第二实验段为开口段,截面为圆形,直径 2 m,最大风速为 15 m/s。本次实验在第一实验段完成。流场测试采用美国 TSI 公司 PIV 系统,包括: Big Sky 激光器(最大工作频率 15 Hz,能量 120 MJ/P,脉宽 3~10 ns); PowerView™ 2MP CCD 相机(12 位输出,16 f/s,CCD 激光防护阵列,分辨率为 1 600 像素  $\times$  1 200 像素);示踪粒子由 ROSCO1700 大型烟雾发生器产生,粒径范围为 1~2  $\mu\text{m}$ 。

弯曲叶片附面层速度场测试方案如图 3 所示,图 2 中的弯曲叶片用透明有机玻璃制成,激光器所产生的片光由风洞闭口段上方打入,并且片光正好切入叶片展长方向的正中位置,相机放置在闭口段

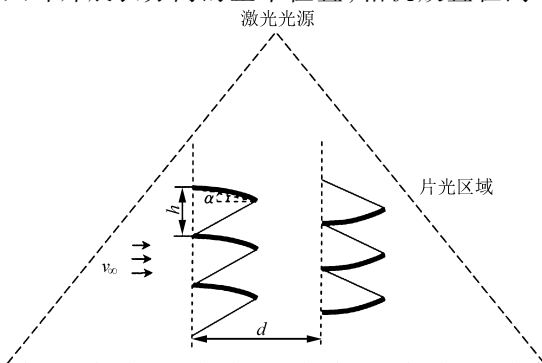


图 3 PIV 实验原理图

Fig. 3 PIV experimental schematic diagram

外侧,风洞闭口段来流风速保持 5 m/s 不变。

### 1.3 实验内容

在 5 m/s 来流风速、叶片安装角  $\alpha = 20^\circ$  的情况下,测试 5 种不同曲率的叶型附面层速度场。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 弯曲叶片附面层流动转换和分离分析

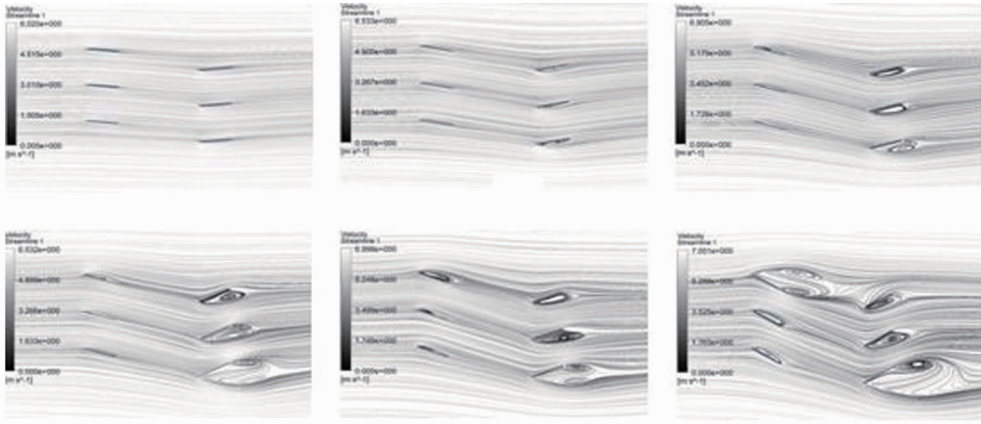
对于固定壁面上二维粘性流动,普朗特提出了如下分离模式:紧贴附着面向前运动的流体,若在某点处突然离开物面,且其后出现回流区,则称流动出现了分离,该点叫做流动转捩点。在顺压力梯度下,附面层流动方向作用力有助于克服壁面切应力,对附面层内流动有增速作用,当然不会回流。在逆压力梯度下,沿附面层流动反方向的作用力对附面层有减速运动,增加了附面层的增长率。由于在附面层中越靠近壁面切应力越大,因此越靠近壁面流动减速越剧烈,若逆压力梯度足够大,则可能首先在物面上方发生流动方向的改变,这样附面层内产生回流即流动分离。由此可知,流动分离是附面层不能克服逆压梯度而在其底层发生“返流”导致的,附面层内速度剖面的丰满程度决定了其可以抵御的逆压梯度的强弱,而速度剖面的形状又与附面层的发展历程有关。本文的研究重点是通过 PIV 实验分析不同弯度的弯曲叶片附面层的流动状况,分别考察了攻角、翼型弯度对流动分离的影响,图 4 为弯曲叶片附面层上的流线,每组图中的攻角  $\alpha$  分别为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 。

#### (1) 前层叶片吸力面附面层流动分离分析

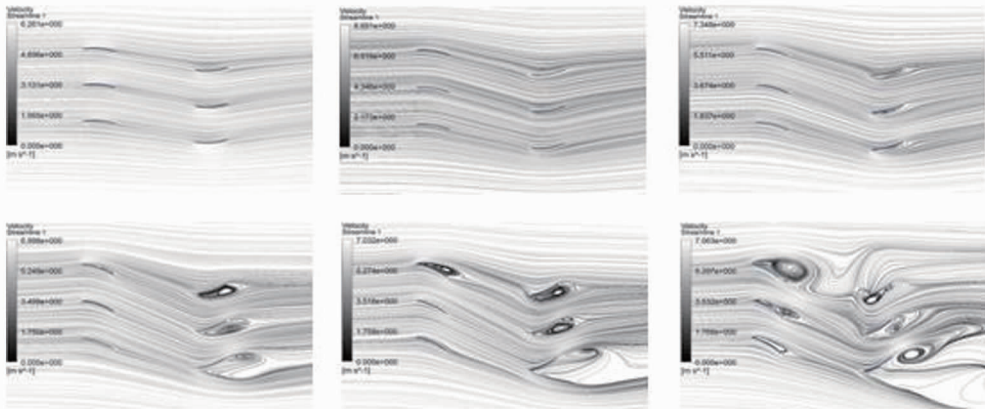
前层叶片上仰过程中,在吸力面上出现流动分离,并产生分离涡,随叶片攻角的增大,分离转捩点越靠近前缘,分离涡逐渐变大,直至吸力面大部分区域产生流动分离,叶片动态失速。从图中可以看出,叶片的弯曲变形对前层叶片吸力面附面层的流动分离有显著影响,随着叶片弯度的增大,吸力面上顺流压力范围较大,有利于使流动保持为层流,进而推迟转捩,不容易产生分离涡,在大攻角情况下其作用效果更为显著。

#### (2) 前层叶片压力面附面层流动分离分析

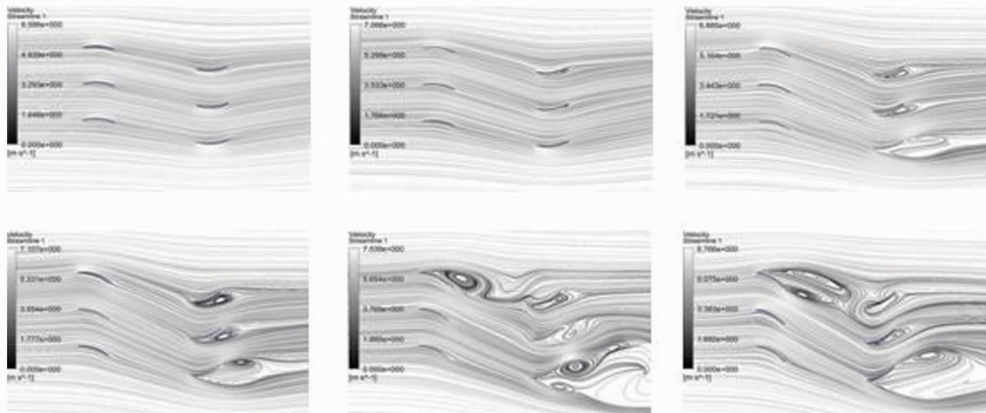
在小攻角情况下,叶片的弯曲变形会使压力面出现死角区,形成低能流体堆积,低能流体相互间摩擦产生旋涡,减小压力面正压区域面积,叶片升力系数急剧下降。从图中可以看出,曲率  $K = 0.026$  的弯曲叶片在  $5^\circ \sim 20^\circ$  攻角范围内,压力面有明显的旋涡,由此引起升力迅速减小,阻力骤然增加;同时,由于叶片的压力分布发生了改变,俯仰平衡也被破坏。



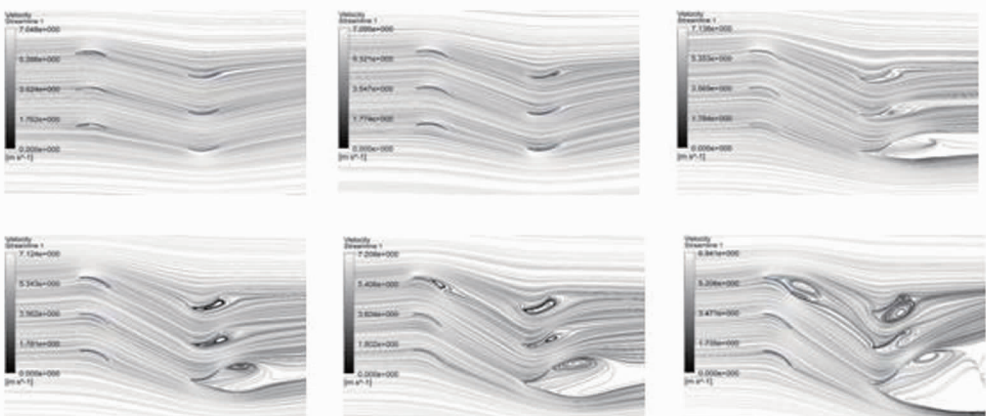
(a)



(b)



(c)



(d)

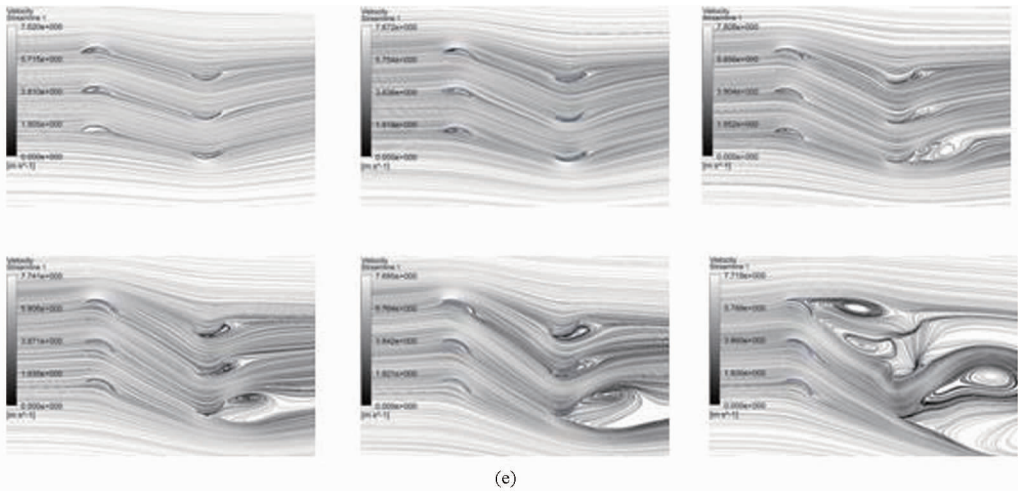


图 4 弯曲叶片附面层上的流线

Fig. 4 Streamline on the boundary layer of curvature blades

(a)  $K=0$  (b)  $K=0.009$  (c)  $K=0.013$  (d)  $K=0.017$  (e)  $K=0.026$ 

### (3) 后层叶片吸力面附面层流动分离分析

后层叶片吸力面处的失速涡随着攻角的增大而逐渐变大,并且涡的位置随着叶片弯度的增大被逐渐抬高,抬高后的动态失速涡受外流的影响,会分裂成两部分,一部分向下脱落,扩大了吸力面处低能流体区域;一部分向压力面处延伸,增大了压力面附近流动的不稳定性。

## 2.2 附面层流动转换和分离对叶片升力系数的影响分析

从图 4 可以定性地看出,叶片适度弯曲,可增强叶片吸力面抵抗分离的能力,并改善流场各参数分布的均匀性。从而增加叶片升力,减小阻力,增大有效升阻比。当叶片发生较大的弯曲变形后,流体在叶片的压力面和吸力面均发生流动分离,此时流场表现出强烈的三维性和非定常性,分离起始点不断向叶片前缘移动,流场中同时存在各种涡系的生产和破裂,导致叶片升力减小。对实验数据进行处理,通过叶片表面压力获得叶片的升力系数。升力系数可以定量表示叶片升力特性,以最优升力特性为目标,寻找柔性叶片风力机叶片合理的弯度和迎角。图 5 和图 6 为前、后层叶片弯度和安装角与升力系数的关系。

由图 5 和图 6 看出,弯度和迎风安装角对前后层叶片的升力系数有较大影响,叶片的弯曲变形会使失速角增大,在叶片弯度曲率  $K=0.017$  时,失速角提高到  $20^\circ$  附近,这时叶片表现出最佳的升力特性,最大升力系数分别为 1.294 和 1.685。在安装角一定时,叶片在一定范围内弯曲变形,前后层叶片升力系数均随着叶片弯度的增大而增大,但叶片的弯度继续增大时,升力系数会出现拐点,并随弯度的增大急剧下降。对后层叶片而言,前层叶片对流体

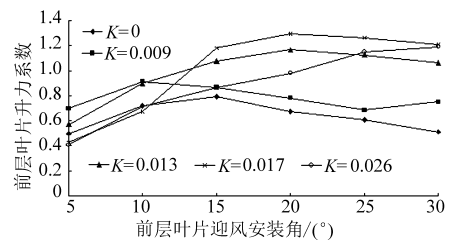


图 5 前层叶片弯度和安装角与升力系数的关系曲线

Fig. 5 Relationship between camber, setting angle and lift coefficient of the front layer blade

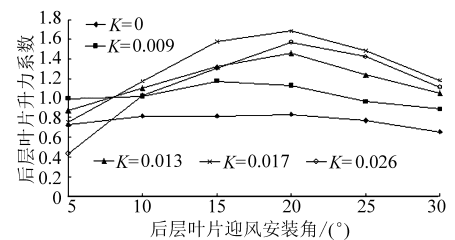


图 6 后层叶片弯度和安装角与升力系数的关系曲线

Fig. 6 Relationship between camber, setting angle and lift coefficient of the rear layer blade

的导流是影响后层叶片升力的主要因素,前后层叶片迎角和接近  $45^\circ$  附近时,后层叶片表现出最佳的升力特性。

## 3 结论

(1) 在不同的攻角条件下,弯曲叶片都有促使前层叶片吸力面附面层变得稳定的作用,减少附面层内的低能流体向空间扩散的范围,因此有助于减少附面层附近因流动分离而产生的升力损失。

(2) 采用适当的弯度及合理的攻角可以控制前层叶片压力面处的旋涡产生,减小压力面处能量损失是提高弯曲叶片升力的主要手段之一。

(3) 通过叶片的弯曲变形来增大其升力系数的

同时,也要考虑后层叶片吸力面附近由于叶片弯曲带来的动态失速涡范围扩大而导致流场不稳定。

指导柔性叶片的选材和设计,为提高叶轮的能量转换效率和运行稳定性提供可靠的实验依据。

(4)通过刚性的弯曲叶片流场 PIV 实验,可以

#### 参 考 文 献

- 1 Muller B, Bippes H. Experimental study of instability modes in a three-dimensional boundary layer[C]. Proceedings AGARD Symposium on Fluid Dynamics of 3D-Turbulent Shear Flows and Transition, Cesme, Turkey, AGARD CP-438,1988.
- 2 Kohama Y, Onodera T, Egami Y. Design and control of cross flow instability field[M]//Duck P W, Hall P. IUTAM Symposium on Nonlinear Instability and Transition in 3D Boundary Layers, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996:147 ~ 156.
- 3 Mack L. Three-dimensional effects in boundary layer stability[C]//Twelfth Symposium on Naval Hydrodynamics,1978:1 ~ 31.
- 4 Haynes T, Reed H. Simulation of swept-wing vortices using nonlinear parabolized stability equations [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 405:325 ~ 349.
- 5 杨文超,杨剑挺,王进,等. 变弯度机翼准定常流动分离特性的实验研究[J]. 中国科学:物理学·力学·天文学, 2012, 42(5): 531 ~ 537.  
Yang Wenchao, Yang Jianting, Wang Jin, et al. Experimental investigation on the quasi-steady flow separation behaviors of a variable camber wing [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, 42(5): 531 ~ 537. (in Chinese)
- 6 俞国华,竺晓程,杜朝辉. 俯仰风力机翼型动态失速数值模拟[J]. 太阳能学报,2011,32(11): 1 571 ~ 1 579.  
Yu Guohua, Zhu Xiaocheng, Du Zhaohui. Numerical simulation of pitching wind turbine airfoil dynamic stall [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(11): 1 571 ~ 1 579. (in Chinese)
- 7 李仁年,袁尚科,魏列江,等. 风力机叶片表面压力的计算与外场测试分析[J]. 实验流体力学, 2012,26(5):52 ~ 56.  
Li Rennian, Yuan Shangke, Wei Liejiang, et al. Measurement and calculation of blade surface pressure for a wind turbine in field [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(5): 52 ~ 56. (in Chinese)
- 8 史志伟,张海涛. 合成射流控制翼型分离的流动显示与 PIV 测量[J]. 实验流体力学, 2008,22(3):49 ~ 53.  
Shi Zhiwei, Zhang Haitao. Flow visualization and PIV measurement of airfoil separated flow control based on synthetic jet[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2008,22(3): 49 ~ 53. (in Chinese)
- 9 肖良华,肖志祥,王丽莎,等. 高升力多段机翼的转捩预测研究[J]. 中国科学:物理学·力学·天文学, 2012,42(3):271 ~ 281.  
Xiao Lianghua, Xiao Zhixiang, Wang Lisha, et al. Transition prediction of high-lift wing[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica,2012,42(3):271 ~ 281. (in Chinese)
- 10 钱炜祺,Randolph C K Leung. 考虑转捩影响的翼型动态失速数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2008,26(1):50 ~ 55.  
Qian Weiqi, Randolph C K Leung. Numerical simulation of airfoil dynamic stall incorporating transition modeling[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(1): 50 ~ 55. (in Chinese)
- 11 王强,赵宁,王同光,等. 考虑转捩的风力机翼型动态失速数值模拟[J]. 太阳能学报, 2012,33(1):113 ~ 119.  
Wang Qiang, Zhao Ning, Wang Tongguang, et al. Numerical simulation of wind turbine airfoil dynamic stall with transition modeling[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2012,33(1):113 ~ 119. (in Chinese)
- 12 Ermira J Abdullah, Cees Bil, Simon Watkins. Numerical simulation of an adaptive airfoil system using SMA actuators[C]// Proceedings of 48th AIAA Aerospace Science Meeting, AIAA 2010—1209,2010.
- 13 邓磊,乔志德,杨旭东,等. 水平轴风力机翼型大攻角气动性能计算研究 [J]. 太阳能学报, 2012,33(3):414 ~ 418.  
Deng Lei, Qiao Zhide, Yang Xudong, et al. CFD calculations of aerodynamic performances of high-of-attack on wind turbine airfoils[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2012,33(3):414 ~ 418. (in Chinese)
- 14 王猛,高永卫,朱奇亮. 利用表面脉动压力探测转捩的数据处理方法研究[J]. 实验力学,2012,27(6): 764 ~ 769.  
Wang Meng, Gao Yongwei, Zhu Qiliang. An investigation on data processing in transition detection using surface pressure fluctuation[J]. Journal of Experimental Mechanics,2012,27(6): 764 ~ 769. (in Chinese)
- 15 乔渭阳,赵磊,罗华玲,等. 低雷诺数涡轮叶片边界层转捩及分离特性测量[J]. 推进技术, 2012,33(6):859 ~ 865.  
Qiao Weiyang, Zhao Lei, Luo Hualing, et al. Measurement of the transition and separation for turbine blade boundary layer with low-reynolds[J]. Journal of Propulsion Technology,2012,33(6):859 ~ 865. (in Chinese)

## Experiment of Flow Transition and Separation on Boundary Layer of Curved Blade on Wind Turbine

Song Li Su Meng Wang Ruizhe Lin Lihua Tian Rui

(College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

**Abstract:** The energy conversion device with flexible blades was taken as the research object; in the closed experimentation section of the low speed wind tunnel, velocity field of curved blade boundary layer was tested by PIV measure technology; when camber of the blades was changed, the rule of flow separation and vortex motion on the boundary layer were obtained. The experimental results showed that the bending deformation of blades in the front layer can reduce accumulation and diffusion low-energy fluid on the boundary layer, and it is helpful to reduce the lift loss of the blades due to flow separation; but for the rear layer, flow instability will increase because the dynamic stall vortex near boundary layer extends due to the bending deformation of blades. The flow field analysis of the curved blades can guide material selection and the design of flexible blades, and provide experimental reference for improvement of the energy conversion efficiency and working stability.

**Key words:** Wind turbine Curved blade Boundary layer Flow separation Camber

---

(上接第 149 页)

## Optimization Based on Exergy Analysis of Solar Assisted Heat Pump Based Heating System of Biogas Project

Shi Huixian Lü Tao Zhu Hongguang Fan Min Xu Kai Ma Jieqiong

(National Engineering Research Center of Protected Agriculture, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In recent years, solar assisted heat pump based heating system has been widely applied in the buildings and greenhouses, but it is little applied and researched in biogas projects. Exergy analysis of solar assisted heat pump based heating system of biogas project was conducted, and the weak links were found in the energy-using process; system status parameters were obtained by solving variable nonlinear optimization problem with Matlab; specific measures and methods of improving system exergy efficiency were proposed and validation experiments were done; the effect of individual status parameters and equipment performance parameters on system exergy efficiency was also studied. The results showed that optimized system exergy efficiency can increase from 18.44% to 28.99%. The status parameter (storage tank temperature  $t_v$ ) and performance parameters (pump system  $C_{COP(year)}$  and collector efficiency  $\eta_{col}$ ) have a great influence on system exergy efficiency. The system exergy efficiency can increase by 0.58% with the temperature increasing by 1°C, increase by 5.94% with the  $C_{COP(year)}$  increasing by one unit of value, increase by 0.045% with the collector efficiency  $\eta_{col}$  increasing by one percentage point.

**Key words:** Solar energy Heat pump Biogas project Exergy analysis Optimization