

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.018

改进 Gurney 襟翼几何参数对翼型气动特性的影响*

张旭¹ 李伟² 邢静忠¹ 肖霞¹

(1. 天津工业大学天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387; 2. 天津城市建设学院能源与安全工程学院, 天津 300384)

【摘要】 采用添加 Gurney 襟翼并光滑下弧面的方式对风力机专用翼型 S822 进行尾缘改型, 利用 $k-\omega$ SST 湍流模型研究原始翼型和改进 Gurney 襟翼翼型的气动特性。计算分析了襟翼高度和压力面光滑连接襟翼顶端的开始位置, 对翼型的升阻力系数、升阻比以及翼型表面压力分布和流场特性的影响。结果表明: 开始改型位置相同时, 随襟翼高度增加, 升力系数在一定攻角范围内呈递增趋势, 阻力系数持续增大, 升阻比在襟翼高度为 0.02 弦长时最高; 襟翼高度相同时, 随开始改型位置后移, 升力系数和升阻比增大, 阻力系数变化很小。研究结论为风力机叶片翼型改型设计提供参考。

关键词: 风力机 改进 Gurney 襟翼 气动特性 几何参数

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0097-05

Effects of Geometrical Parameters of Improved Gurney Flap on Airfoil Aerodynamic Characteristics

Zhang Xu¹ Li Wei² Xing Jingzhong¹ Xiao Xia¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

2. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract

The trailing edge of wind turbine airfoil S822 was modified by adding a Gurney flap and smoothing the lower cambered surface. The aerodynamic characteristics of S822 airfoil and its improved Gurney flap airfoils were studied with $k-\omega$ SST turbulence model. The effects of the flap height and starting modification position on the lift and drag coefficients, lift-drag ratio, airfoil surface pressure distribution and flow field characteristics were analyzed. The results showed that if the starting modification position was the same, the lift coefficient in certain range of attack angle and the drag coefficient increased with the increasing of the flap height. The lift-drag ratio was the maximum when the flap height was 2% chord length. If the flap height was the same, the lift coefficient and lift-drag ratio increased, and the drag coefficient changed little when the starting modification position was gradually close to the trailing edge. The research can provide references for designing airfoils of wind turbine blade.

Key words Wind turbine, Improved Gurney flap, Aerodynamic characteristics, Geometrical parameters

引言

叶片是风力机捕获风能的关键部件, 其翼型空

气动力学性能直接影响风力机的运行特性和使用寿命^[1~3]。通过叶片翼型改型, 可改善风力机的气动性能^[4~6]。翼型改型方法有很多种, 例如在翼型压

收稿日期: 2012-05-17 修回日期: 2012-07-02

* 国家自然科学基金资助项目(11102134)、天津市科技支撑计划重点资助项目(10ZCGYGX02000)、天津市高等学校科技发展基金计划资助项目(20110418)和住房和城乡建设部软科学研究资助项目(2011-R1-28)

作者简介: 张旭, 讲师, 博士, 主要从事风力机空气动力学和结构力学研究, E-mail: zhangxu@tjpu.edu.cn

力面后缘加装襟翼、增加尾缘厚度形成钝尾缘结构等。其中,加装 Gurney 襟翼是一种增升效果显著的改型方式,但 Gurney 襟翼会阻碍压力面上气流流动,以致升力增加时阻力也会增加。此外,Gurney 襟翼与翼型的连接可靠性也有问题^[7]。为了提高翼型升阻比和增加 Gurney 襟翼与翼型的连接强度,将 Gurney 襟翼和钝尾缘结构结合,用光滑曲线从某弦长位置连接压力面和襟翼顶端形成改进 Gurney 襟翼翼型^[8-10]。夏商周等的研究表明:带 Gurney 襟翼翼型改型对流场有强烈下洗作用,改变了翼型压力面和吸力面的压力分布,其升力及升阻比均比翼型原型和单纯 Gurney 襟翼翼型有显著提高^[7-8]。韩中合等对加装 Gurney 襟翼和改进后形成钝尾缘的桨叶进行气动性能分析与优化设计,并比较了它们功率输出特性^[10]。尽管国内外已经开展了一些改进 Gurney 襟翼翼型气动性能的研究,但未充分分析改进 Gurney 襟翼几何参数对翼型气动特性的影响。

本文基于计算流体力学方法(CFD),利用 Fluent 软件对风力机叶片的翼型原型和改进 Gurney 襟翼翼型进行数值模拟,研究襟翼高度和压力面光滑连接襟翼顶端的开始位置对翼型气动特性的影响,为 Gurney 襟翼翼型改型设计和优化提供指导。

1 研究对象

选用美国可再生能源实验室(NREL)风力机专用 S 系列翼型 S822 为研究对象,此翼型已在 NREL 的国家风能技术中心(NWTC)进行了性能试验,测试结果见文献[11]。

翼型 S822 原型型线如图 1 所示。在不改变吸力面和弦长的情况下,采用添加 Gurney 襟翼并光滑下弧面的方式修改 S822 翼型。从压力面尾缘某弦长位置到襟翼顶端存在无数条光滑曲线,不同光滑曲线对翼型气动特性影响很小^[12]。三次样条函数能很好保证曲线的光滑性和连续性,因此用其描述图 2 所示光滑曲线。此外,翼型由一系列控制点表示,针对控制点进行光滑曲线表述,表达式为

$$\begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 - h \left(\frac{x_0 - x_b}{c - x_b} \right)^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中 h ——襟翼高度 c ——弦长
 x_b, y_b ——光滑连接襟翼顶端的开始位置坐标
 x_0, y_0 ——原始翼型某点坐标
 x, y ——改型翼型某点对应的新坐标

根据式(1),绘出 S822 翼型改型的型线(图 3)。



图 1 S822 翼型原型
Fig. 1 Prototype of S822 airfoil

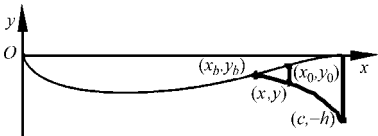


图 2 光滑连接曲线示意图
Fig. 2 Blending curves

当 Gurney 襟翼高度分别为 $0.005c$ 、 $0.01c$ 、 $0.02c$ 和 $0.04c$ 时,将压力面从 $0.90c$ 位置处用光滑曲线与襟翼顶端连接,形成图 3a 改型型线;在 Gurney 襟翼高度为 $0.02c$ 时,分别从压力面 $0.80c$ 、 $0.85c$ 、 $0.90c$ 和 $0.95c$ 位置处开始光滑连接襟翼顶端,形成图 3b 改型型线。

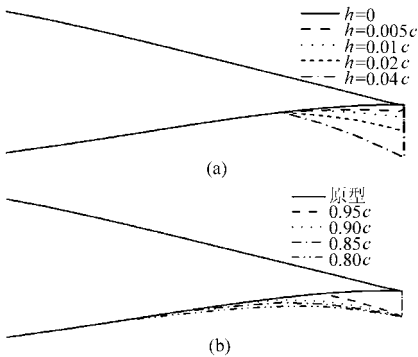


图 3 S822 翼型改型
Fig. 3 S822 modified airfoils
(a) 不同 Gurney 襟翼高度 (b) 不同开始改型位置

2 数值计算方法及适应性验证

应用 CFD 方法,采用 Fluent 软件对 S822 翼型原型进行二维数值模拟,并对比分析数值计算结果与试验数据。

2.1 数值计算方法

控制方程组为二维不可压缩 N-S 方程,湍流模型选用较适合模拟风力机翼型稳态扰流情况的 $k-\omega$ SST 模型^[13]。各方程离散格式均采用二阶迎风格式,压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法^[14-15]。整个计算区域由直径 $25c$ 的半圆形和长 $20c$ 、宽 $25c$ 的矩形组成,翼型在半圆圆心附近。计算域上、下和左边界均采用速度进口边界条件,速度由 $Re = 0.5 \times 10^6$ 确定;计算域右边界采用压力出口边界条件,表压力给定 0 Pa ;翼型表面满足壁面无滑移条件。采用 C 型结构化网格划分模型,并对翼型前后缘以及翼型附近的网格进行局部加密,如图 4 所示。进行网格无关性验证,确定网格总数在 7 万左右。

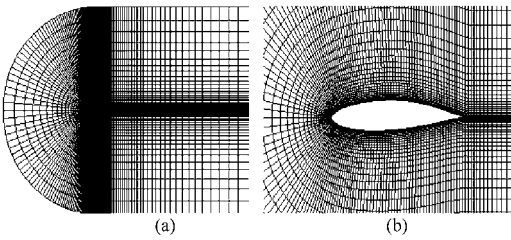


图 4 翼型计算网格

Fig. 4 Calculated grid of airfoil

(a) 计算域网格划分 (b) 翼型局部网格划分

2.2 适应性验证

计算攻角在 $-5^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间变化时的升力、阻力系数,得出翼型 S822 各攻角下升力系数、阻力系数的数值模拟结果与试验数据对比图(图 5)。由图可知:数值计算和试验的阻力系数曲线相吻合。计算所得的升力系数与试验值在 $0^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 攻角之间有一定偏差,但相差不大,其他攻角下吻合良好。故采用本文数值方法进行风力机叶片翼型气动特性计算是正确的。

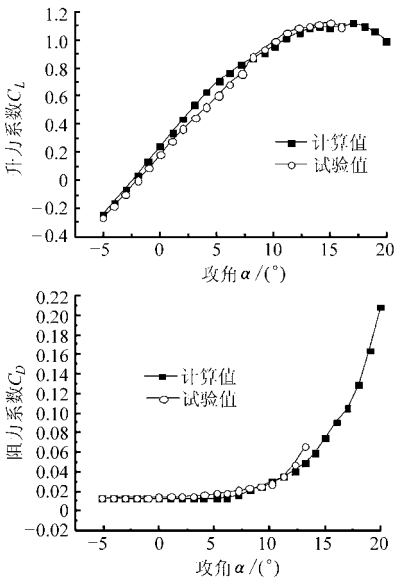


图 5 S822 翼型计算值与试验值比较

Fig. 5 Comparison of calculated and measured aerodynamic characteristics for S822 airfoil

3 结果与讨论

对原始 S822 翼型及其一系列改型的气动特性进行比较计算,分析改进 Gurney 襟翼几何参数对翼型表面压力分布、流场结构以及升、阻力系数、升阻比的影响,获得了翼型气动特性随襟翼高度和开始改型位置的变化规律。

3.1 改进 Gurney 襟翼高度对翼型气动特性的影响

对 S822 翼型原型和图 3a 所示具有不同襟翼高度的改进 Gurney 襟翼翼型进行数值计算,得到翼型表面的压力系数分布曲线(图 6)、流线图(图 7),以

及升力、阻力系数(图 8)和升阻比(图 9)随攻角变化曲线。

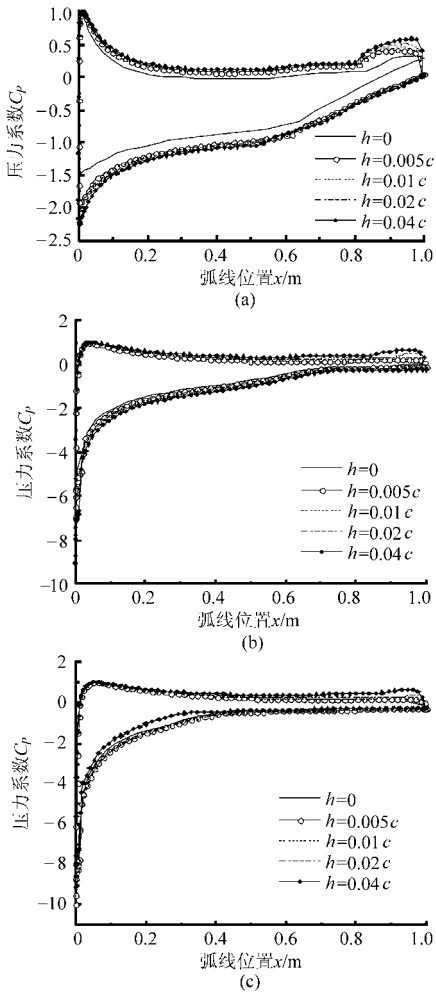


图 6 压力系数分布曲线

Fig. 6 Distributions of pressure coefficients

(a) $\alpha = 5^{\circ}$ (b) $\alpha = 13^{\circ}$ (c) $\alpha = 18^{\circ}$

由图 6 可知,改型翼型压力面的压力系数较原始 S822 翼型大,且随襟翼高度增加呈递增趋势,在尾缘附近表现更明显。改型翼型吸力面的压力系数较原始 S822 翼型小,且随襟翼高度增加呈递减趋势。襟翼高度为 $0.005c$ 、 $0.01c$ 、 $0.02c$ 的改型翼型一直保持此趋势。攻角小于 13° ,襟翼高度为 $0.04c$ 的改型翼型也是如此;而攻角达到 13° 之后,其吸力面压力系数反而变大,并在攻角 18° 左右超过翼型原型。

由图 7 可以看出,攻角 5° 时,翼型原型和 4 种不同襟翼高度改型翼型的扰流均为附着流,未发生流动分离现象,具有较好的气动特性。攻角达到 13° ,襟翼高度为 $0.04c$ 的改型翼型吸力面后部出现流动分离,形成明显的漩涡。而此时翼型原型和具有 $0.005c$ 、 $0.01c$ 、 $0.02c$ 襟翼高度改型翼型的扰流仍为附着流,未发生气流与翼型表面分离。攻角达到 15° 左右,襟翼高度为 $0.02c$ 的改型翼型也发生流动

分离。攻角超过 18°之后,翼型原型和所有改型翼型吸力面均出现了流动分离。可见,襟翼高度越大,翼型吸力面的流动分离出现得越早。

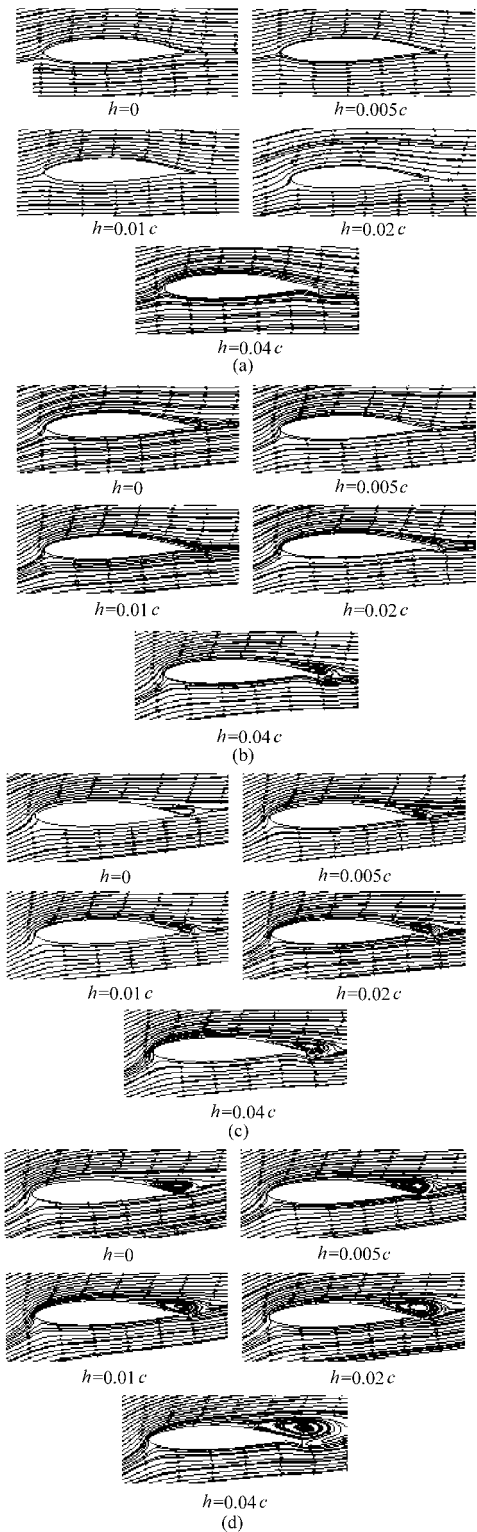


图 7 S822 翼型及其改型的流线图

Fig. 7 Streamlines of S822 airfoil and its modified airfoils
(a) $\alpha = 5^\circ$ (b) $\alpha = 13^\circ$ (c) $\alpha = 15^\circ$ (d) $\alpha = 18^\circ$

由图 8 可知,4 个具有不同襟翼高度的改进 Gurney 襟翼翼型升力系数、阻力系数均高于原始 S822 翼型,且升力、阻力系数随襟翼高度增加均呈

递增趋势。攻角超过 13°,襟翼高度为 0.04c、0.02c、0.01c、0.005c 的改型翼型和原始 S822 翼型先后出现升力系数随攻角增加而减小的趋势。相比原始 S822 翼型和其他襟翼高度的改型翼型,襟翼高度为 0.04c 的改型升力系数下降很快。造成这些现象的原因是:攻角小于 13°,随襟翼高度增加,翼型压力面压力系数逐渐增大,吸力面压力系数逐渐减小,翼型上、下表面压差增大,使得升力系数随之增大。攻角大于 13°,襟翼高度为 0.04c、0.02c、0.01c、0.005c 的改型翼型和原始 S822 翼型吸力面的气流先后发生分离,依次出现失速现象,即失速攻角随襟翼高度增加呈递减趋势;同时,翼型失速导致升力系数减小。

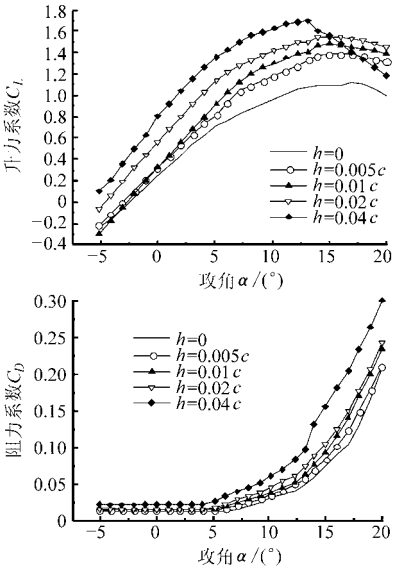


图 8 不同襟翼高度的改型翼型升力和阻力系数曲线
Fig. 8 Lift and drag coefficients of modified airfoils with different Gurney heights

由图 9 可知,襟翼高度为 0.02c 的 S822 翼型改型升阻比最高,说明改进 Gurney 襟翼翼型的最优襟翼高度为 0.02c。

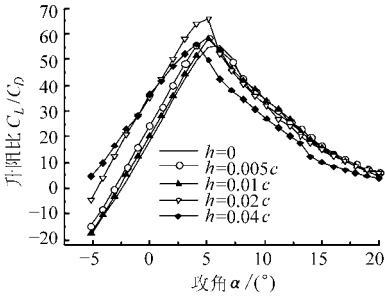


图 9 不同襟翼高度的改型翼型升阻比曲线
Fig. 9 Lift-drag ratios of modified airfoils with different Gurney heights

3.2 开始改型位置对翼型气动特性的影响

当 S822 翼型改型采用最优襟翼高度 0.02c 时,研究压力面光滑连接襟翼顶端的开始位置对 S822

翼型原型和图 3b 所示改型气动特性的影响。通过数值计算得到升力系数、阻力系数(图 10)和升阻比(图 11)随攻角变化的曲线以及翼型表面压力系数分布曲线(图 12)。

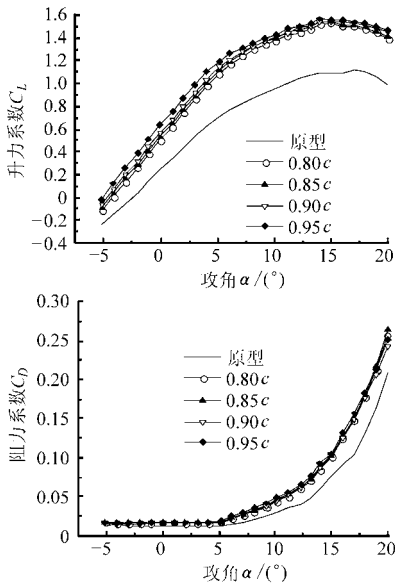


图 10 升力系数和阻力系数随开始改型位置变化曲线

Fig. 10 Lift and drag coefficients for different starting modification positions

由图 10 和图 11 可以看出,从压力面不同弦长位置光滑连接襟翼顶端的 4 个改进 Gurney 襟翼翼型升力系数、阻力系数和升阻比均高于原始 S822 翼型。升力系数和升阻比随开始改型位置后移呈递增趋势,而从压力面不同弦长位置开始改型对阻力系数影响不大。

由图 12 可知,随开始改型位置后移,压力面压力系数增大,吸力面压力系数减小,翼型压力面与吸力面的压差增大,因而升力系数增加;同时,由于阻力系数变化不明显,翼型升阻比也呈递增趋势。由此可见,在叶片制造工艺允许下,光滑连接襟翼顶端

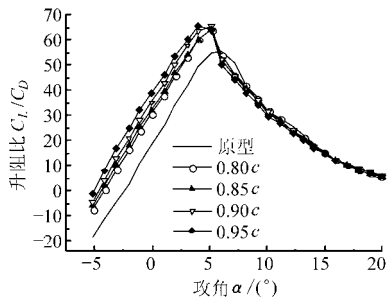


图 11 升阻比随开始改型位置变化曲线

Fig. 11 Lift-drag ratios for different starting modification positions

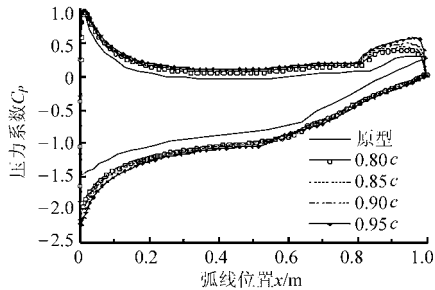


图 12 开始改型位置不同时压力系数分布($\alpha=5^\circ$)

Fig. 12 Pressure coefficients for different starting modification positions

的开始位置应尽量靠近翼型尾缘。

4 结论

(1)改进 Gurney 襟翼翼型与原始 S822 翼型相比,气动性能有明显改善。

(2)随襟翼高度增加,升力系数和阻力系数均增大;翼型吸力面的流动分离出现得越来越早,失速攻角呈减小趋势。此外,襟翼高度为 0.02c 的改型翼型升阻比最高。

(3)开始改型位置越靠近翼型尾缘,升力系数和升阻比越大,阻力系数变化很小。因此,采用 Gurney 襟翼与钝尾缘结合方法进行翼型改型时,应尽量靠近尾缘开始光滑连接襟翼顶端。

参 考 文 献

- 1 Aubrey C, Kjaer C, Millais C, et al. Wind force 12 [R]. Brussels Belgium: European Wind Energy Association & Greenpeace International, 2005.
- 2 Fuglsang P, Bak C. Development of the Risø wind turbine airfoils [J]. Wind Energy, 2004, 7(2): 145 ~ 162.
- 3 靳允立, 胡骏. 翼型失速及雷诺数变化对风力机气动性能影响的数值研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(9): 1 280 ~ 1 285. Jin Yunli, Hu Jun. Numerical research of the influence of airfoil stall and Reynolds number change on wind turbine aerodynamic performance [J]. Acta Energaiae Solaris Sinica, 2009, 30(9): 1 280 ~ 1 285. (in Chinese)
- 4 Deman T, Earl H D. Aerodynamic loading for an airfoil with an oscillating Gurney flap [J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(4): 1 245 ~ 1 257.
- 5 Liebeck R H. Design of subsonic airfoils for high lift [J]. Journal of Aircraft, 1978, 15(9): 547 ~ 561.
- 6 Baker J P, Mayda E A, van Dam C P. Experimental analysis of thick blunt trailing-edge wind turbine airfoils [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2006, 128(4): 422 ~ 431.

- Zhao Zhenzhou, Zheng Yuan, Xu Xiaoyun, et al. Performance optimization of helix Savonius rotor based on part configuration parameters [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2010, 31(11): 1 480 ~ 1 484. (in Chinese)
- 6 Rabah K V O, Osawa B M. Design and field testing of Savonius wind pump in east Africa [J]. *International Journal of Ambient Energy*, 1996, 17(2): 89 ~ 94.
- 7 Hayashi T, Li Y, Hara Y. Wind tunnel tests on different phase three-stage Savonius rotor [J]. *JSME International Journal Series B*, 2005, 48(1): 9 ~ 16.
- 8 Menet J L. A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study [J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(11): 1 843 ~ 1 862.
- 9 寇薇,苑宾,李琦,等. 一种组合型垂直轴风力发电机的结构设计[J]. *电力科学与工程*, 2011, 27(5): 25 ~ 28.
Kou Wei, Yuan Bin, Li Qi, et al. Combined vertical axis wind turbine design[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2011, 27(5): 25 ~ 28. (in Chinese)
- 10 Feng Fang, Li Shengmao, Li Yan, et al. Torque characteristics simulation on small scale combined type vertical axis[J]. *Physics Procedia*, 2012, 24A: 781 ~ 786.
- 11 李岩,田川公太朗,冯放. 直线翼垂直轴风力机起动性的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(6): 885 ~ 890.
Li Yan, Tagawa Kotaro, Feng Fang. An experimental study on the starting performance of straight-bladed vertical axis wind turbine [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(6): 885 ~ 890. (in Chinese)
- 12 李岩,田川公太朗. 基于烟线法的直线翼垂直轴风力机静态流场可视化试验[J]. *可再生能源*, 2009, 27(3): 32 ~ 35.
Li Yan, Tagawa Kotaro. A visual experiment by smoke wire way on the static flow field of a straight-bladed vertical axis wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2009, 27(3): 32 ~ 35. (in Chinese)
-

(上接第 101 页)

- 7 申振华,夏商周,桂巧映,等. 带 Gurney 襟翼翼型改型的气动性能的数值研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(9): 988 ~ 991.
Shen Zhenhua, Xia Shangzhou, Gui Qiaoyi, et al. A numerical study of aerodynamic characteristics of modified airfoil with Gurney flap[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, 28(9): 988 ~ 991. (in Chinese)
- 8 夏商周,申振华. 改型尾缘对翼型流场影响的数值模拟[J]. *沈阳航空工业学院学报*, 2005, 22(5): 1 ~ 3.
Xia Shangzhou, Shen Zhenhua. Numerical simulation effect of modified trailing edge on airfoil flow field [J]. *Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering*, 2005, 22(5): 1 ~ 3. (in Chinese)
- 9 Bloy A W. Enhanced airfoil performance using trailing-edge flaps [J]. *Journal of Aircraft*, 1997, 34(4): 569 ~ 571.
- 10 韩中合,焦红瑞. 加装钝尾缘改善风力机桨叶气动性能的研究[J]. *动力工程*, 2009, 29(11): 1 073 ~ 1 077.
Han Zhonghe, Jiao Hongrui. Study on aerodynamic performance of airfoil by mounting a blunt trailing edge to wind blade [J]. *Journal of Power Engineering*, 2009, 29(11): 1 073 ~ 1 077. (in Chinese)
- 11 Michael S Selig, Bryan D McGranahan. Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines [R]. Golden Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- 12 张磊,杨科,赵晓路,等. 不同尾缘改型方式对风力机钝尾缘翼型气动性能的影响[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(5): 773 ~ 776.
Zhang Lei, Yang Ke, Zhao Xiaolu, et al. Aerodynamic influence of different trailing-edge changing methods to the blunt trailing-edge airfoil [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(5): 773 ~ 776. (in Chinese)
- 13 任年鑫,欧进萍. 大型风力机二维翼型气动性能数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(8): 1 087 ~ 1 091.
Ren Nianxin, Ou Jinping. Numerical simulation for pneumatic characteristics for two-dimensional airfoils large wind turbine [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, 30(8): 1 087 ~ 1 091. (in Chinese)
- 14 杨从新,巫发明,张玉良. 基于滑移网格的垂直轴风力机非定常数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(6): 98 ~ 102.
Yang Congxin, Wu Faming, Zhang Yuliang. Numerical simulation on unsteady rotated flow of a vertical axis wind turbine based on moving meshes [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(6): 98 ~ 102. (in Chinese)
- 15 李银然,李仁年,王秀勇,等. 计算模型维数对风力机翼型气动性能预测的影响[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 115 ~ 119.
Li Yinran, Li Rennian, Wang Xiuyong, et al. Effects of the calculation models with different dimension on the aerodynamic performance prediction for wind turbine airfoil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(2): 115 ~ 119. (in Chinese)