

组合型垂直轴风力机结合角度对起动性的影响*

李岩¹ 田文强¹ 冯放² 丁国奇¹ 和庆斌¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

【摘要】 与 Savonius 风轮组合使用是改善直线翼垂直轴风力机起动性的重要方法,而二者的结合角度对组合型垂直轴风力机的起动性有很大影响。首先,设计了采用 FX63-145 和 NACA0018 翼型的直线翼垂直轴风力机和 Savonius 风轮,利用风洞试验测试并分析了各自的起动性。然后,分别将 Savonius 风轮的最佳起动区域与两种直线翼垂直轴风力机的最差起动区域和最佳起动区域进行组合,测试了在这 4 种不同组合方式下的组合型垂直轴风力机的起动性。结果表明:对于采用对称翼型的直线翼垂直轴风力机,将直线翼垂直轴风力机的最佳起动区域与 Savonius 风轮的最佳起动区域结合的方法可以更好地提高组合型垂直轴风力机的起动性。而对于采用非对称翼型的直线翼垂直轴风力机,两种组合方式各有优缺点。

关键词: 直线翼垂直轴风力机 Savonius 风轮 组合型 结合角度 风洞试验 起动性

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0102-05

Starting Performance Effects of Combining Angle on Combined Type VAWT

Li Yan¹ Tian Wenqiang¹ Feng Fang² Ding Guoqi¹ He Qingbin¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract

Combined with Savonius rotor is an important way to improve starting performance of straight-bladed vertical axis wind turbine (SB-VAWT). The starting performance of the combined type VAWT was largely affected by the combining angle of the two type turbines. Firstly, an SB-VAWT with NACA0018 and FX63-145 airfoils and a Savonius rotor were made and their starting performances were respectively tested. Then, optimal starting performance area of Savonius rotor was respectively combined with optimal starting performance area and the worse starting performance of SB-VAWT, starting performances of combined type VAWT with four different combining ways were tested by using a wind tunnel. For SB-VAWT with symmetrical airfoils, better starting performance of combined type VAWT can be obtained when its optimal starting performance area was combined with Savonius rotor. For SB-VAWT with asymmetric airfoils, both of the two ways have advantages and disadvantages.

Key words SB-VAWT, Savonius rotor, Combined type, Combining angle, Wind tunnel test, Starting performance

引言

直线翼垂直轴风力机(SB-VAWT)是达里厄型风力机的一种,由于其结构简单、加工方便,近年来

在中小型风能领域受到了国内外广泛的关注^[1-2]。然而,起动性的不佳在一定程度上制约了其发展,因此研究直线翼垂直轴风力机起动性有着极其重要的意义^[3]。以往的研究表明,利用起动力矩较大的阻

收稿日期: 2012-05-28 修回日期: 2012-07-25

* 黑龙江省教育厅海外学人科研资助项目(1153h01)

作者简介: 李岩,教授,主要从事风能以及可再生能源综合利用与开发研究, E-mail: ly_neau@yahoo.com.cn

力型垂直轴风轮与达里厄型风力机进行组合,是解决达里厄型风力机起动性的一种重要手段。而在阻力型垂直轴风轮中,Savonius 风轮具有非常好的自起动性能^[4~7],因此国内外的一些学者将 Savonius 风轮与达里厄型风力机进行组合,进行一些研究。Menet 设计了一种两段式的 Savonius 风轮,并将其与典型的达里厄型风力机进行组合,起到了辅助起动的作用^[8]。寇薇等设计出一种用超越离合器将直线翼垂直轴风力机与 Savonius 风轮组合在一起的风力机^[9]。冯放等利用数值模拟的方法对组合型风力机进行了研究,结果表明加装 Savonius 风力机可以在一定程度上提高直线垂直轴风力机的起动特性^[10]。

直线翼垂直轴风力机的性能与叶片的翼型以及其在静止状态时的迎风旋转角度存在很大的关系^[11]。同时,Savonius 风轮的起动力矩也与旋转角密切相关。因此,将二者组合后,其结合角度必然会对组合型垂直轴风力机的起动性造成一定的影响。然而,目前国内外对这一问题还没有进行深入研究。为此,本文对此进行风洞试验,在测试 Savonius 风轮及分别采用 FX63-145(非对称)和 NACA0018(对称)翼型的 2 台四叶片直线翼垂直轴风力机起动性的基础上,测试在 4 种结合角度下组合型风力机的起动性。对比分析结合角度对组合垂直轴风力机起动性的影响。

1 试验设备与方法

1.1 风洞简介

试验使用开口直流低速风洞,长 9.1 m、宽 2.3 m、出风口尺寸为 1 m×1 m,可以得到 1~25 m/s 的均匀风速。在风洞内装有风速传感器,可将风速转换为电信号传到计算机,计算机通过反馈的信号来调节风速。

1.2 组合风力机模型

依据风洞尺寸和测试系统条件,直线翼垂直轴风力机的几何参数如下:叶片个数 4 枚、风轮直径 0.9 m、翼型 NACA0018(对称翼型)和 FX63-145(非对称翼型)、风轮高度 0.9 m、叶片弦长 0.22 m。Savonius 风轮的几何参数为:风轮直径 0.3 m、风轮高度 0.5 m、单个叶片直径 0.2 m、叶片重叠区 0.1 m。总体设计目标:风速 12 m/s 时功率为 200 W。

1.3 试验方法

图 1 为风洞试验系统简图,主要包括风洞、风速调控系统以及试验模型 3 部分。试验过程中,通过风速调控系统调节风洞风速,测试风速范围为 4~15 m/s。风力机的旋转角度由安装在风力机模型法

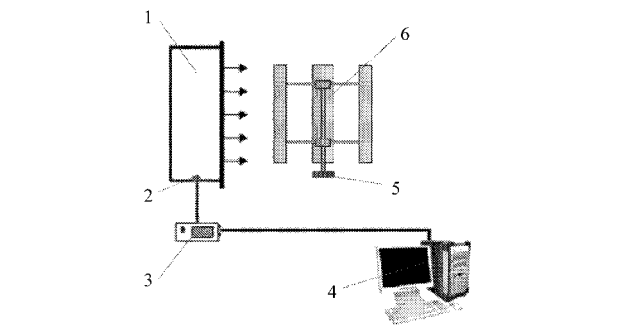


图 1 风洞试验系统

Fig. 1 Experimental system of wind tunnel

1. 风洞 2. 传感器 3. A/C 转换器 4. 计算机 5. 刻度盘
6. 风力机模型

兰盘上的角度刻度盘来调节,精确度为 1°。

两种风力机相对于来流旋转角度定义如图 2 所示。设直线翼垂直轴风力机的旋转角为 α_1 , Savonius 风轮的旋转角为 α_2 。试验步骤如下:①测试 Savonius 风轮的起动性,旋转角 α_2 为 0°~180°,试验间隔为 6°。将 Savonius 风轮安装到风力机主轴上,调整其位置,调节风速为 4 m/s,待风速稳定后,以 1 m/s 的速度逐渐加大风速直至风轮起动。②分别测试采用 FX63-145 和 NACA0018 翼型的四叶片直线翼垂直轴风力机的起动性,旋转角 α_1 为 0°~90°,试验间隔为 6°,方法与①类似。③根据上述的测试结果,将 Savonius 风轮与直线翼垂直轴风力机进行组合,然后以同样的方法测试组合型垂直轴风力机的起动性,以直线翼垂直轴风力机的旋转角 α_1 为准, α_1 为 0°~180°,试验间隔为 6°。组合的方式分为两种,即将直线翼垂直轴风力机起动性最好的旋转角区域与 Savonius 风轮起动性最好的旋转角区域进行组合和将直线翼垂直轴风力机起动性最差的旋转角区域与 Savonius 风轮起动性最好的旋转角区域进行组合。

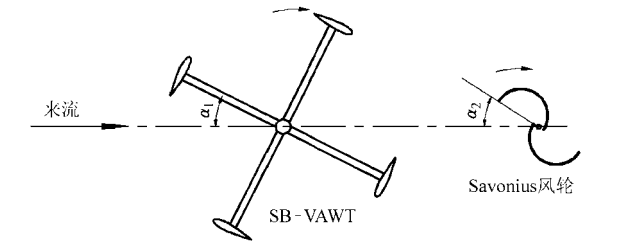


图 2 风力机旋转角示意图

Fig. 2 Rotation angles of wind turbines

2 试验结果

2.1 单机测试结果

两种直线翼垂直轴风力机的起动性如图 3 所示,起动风速越低起动性越好。直线翼垂直轴风力机的起动性不稳定,不同的旋转角下起动风速各不

相同。其中,NACA0018 风力机在旋转角为 $54^{\circ} \sim 66^{\circ}$ 的区域内有较好的起动性,称该区域为最佳起动区域;在旋转角为 $78^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的区域内起动性较差,称该区域为最差起动区域。同理,FX63-145 最佳起动区域为 $54^{\circ} \sim 84^{\circ}$,最差起动区域为 $0^{\circ} \sim 24^{\circ}$,Savonius 风轮最佳起动区域为 $24^{\circ} \sim 48^{\circ}$ 。

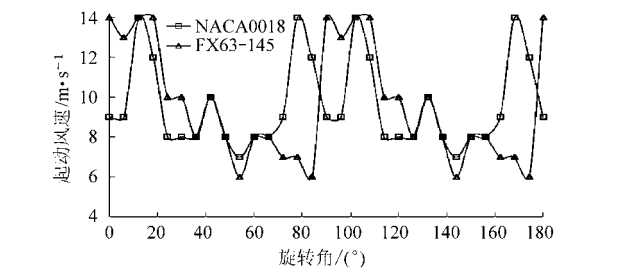


图3 直线翼垂直轴风力机起动性
Fig.3 Starting performance of SB-VAWT

根据单机测试结果,采用两种角度结合方式,如表1所示。原则是将 Savonius 风轮的最佳起动区域分别与直线翼垂直轴风力机的最佳或最差起动区域组合。方式2和方式4的主要目的是使风力机获得最小起动风速。方式1和方式3目的是消除风力机起动的死点,即让风力机在不同的旋转角下都能有相近的起动风速。

表 1 组合方式				
Tab.1 Ways of combination				
组合方式	翼型	$\alpha_1/(^{\circ})$	$\alpha_2/(^{\circ})$	组合方法
方式 1	NACA0018	78	24	差 + 优
方式 2	NACA0018	54	24	优 + 优
方式 3	FX63-145	0	24	差 + 优
方式 4	FX63-145	54	24	优 + 优

2.2 NACA0018 风力机的组合试验

图4为采用NACA0018翼型的风力机组合前后起动风速随旋转角的变化曲线。由图可知,方式1条件下,最高起动风速为11 m/s,最低起动风速7 m/s。方式2条件下,最高起动风速为12 m/s,最低起动风速为6 m/s。为了进一步分析组合型垂直轴风力机起动性的提高程度,定义无量纲参数起动风速改善率,简称改善率 η ,其计算公式为

$$\eta = \frac{v_i - v_{ic}}{v_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中 v_i ——直线翼垂直轴风力机旋转角为 i 时的起动风速

v_{ic} ——组合型垂直轴风力机旋转角为 i 时的起动风速

在改善率 η 的基础上,又定义平均改善率 η_a ,计算公式为

$$\eta_a = \frac{\eta_{i1} + \eta_{i2} + \cdots + \eta_{in}}{n} \tag{2}$$

式中 n ——试验旋转角数

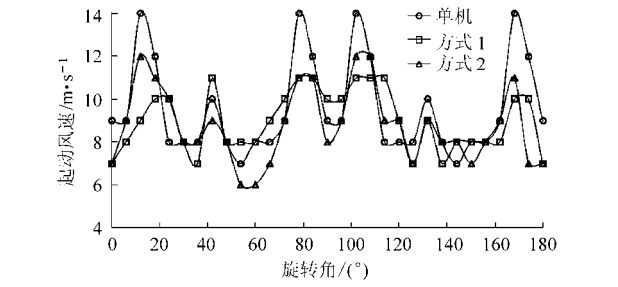


图4 NACA0018 风力机的起动风速
Fig.4 Starting wind speed of SB-VAWT with NACA0018

组合风力机的改善率如图5所示。在方式1条件下,组合型垂直轴风力机的平均改善率为3.6%,最大改善率为35.7%,有50%的位置得到改善。在方式2条件下,组合型垂直轴风力机的平均改善率为7.1%,最大改善率为41.7%,有53.1%的位置提升。由此可知,方式2对组合型垂直轴风力机的起动性有更好的改善。

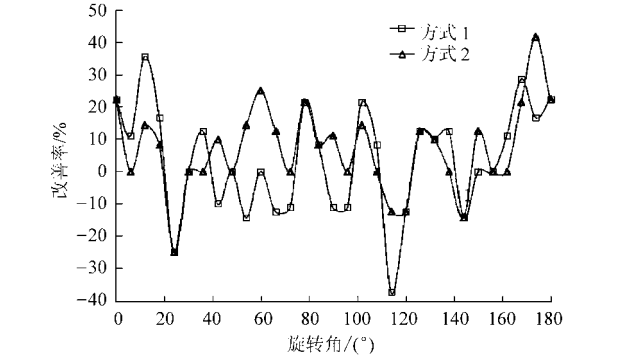


图5 NACA0018 风力机的改善率
Fig.5 Improving rate of SB-VAWT with NACA0018

2.3 FX63-145 风力机的组合试验

图6为采用FX63-145翼型的风力机组合前、后起动风速随旋转角的变化曲线。在方式3条件下,最高起动风速为11 m/s,最低起动风速6 m/s。对于方式4,最高起动风速为14 m/s,最低起动风速为5 m/s。

组合型垂直轴风力机的起动风速改善率如图7所示。在方式3条件下,组合型垂直轴风力机的平均改善率为13.8%,最大改善率为46%,有62.5%的位置得到改善。在方式4条件下,组合型垂直轴风力机的平均改善率为7.8%,最大改善率为53%,有71.9%的位置得到了改善。由此可知,从平均改善率的角度来看,方式3要优于方式4;从最大改善率以及改善位置比例来看,方式4要优于方式3。

从翼型方面来看,对比同为“差+优”组合的方

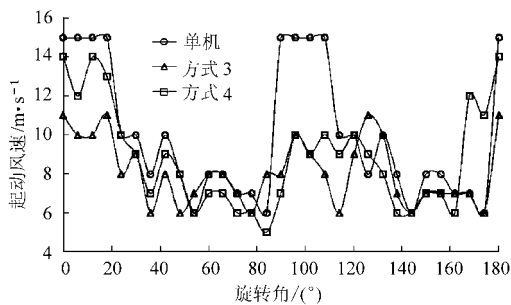


图 6 FX63-145 风力机的起动风速

Fig. 6 Starting wind speed of SB-VAWT with FX63-145

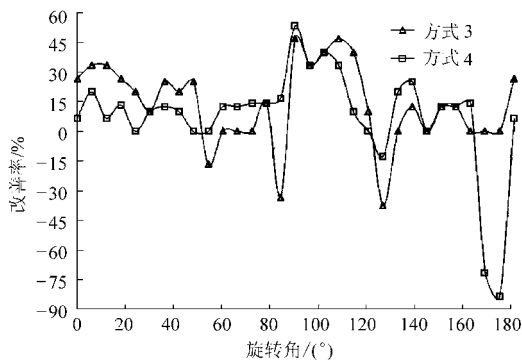


图 7 FX63-145 风力机的改善率

Fig. 7 Improving rate of SB-VAWT with FX63-145

式 1 与方式 3 的试验结果可知,采用 NACA0018 对称翼型的组合型风力机的各项起动性能参数均低于采用 FX63-145 非对称翼型的组合风力机。同理,对比方式 2 与方式 4 可知,采用非对称翼型的组合型垂直轴风力机,其性能参数也优于采用对称翼型的组合风力机。因此,对于组合风力机,采用非对称翼型的直线翼垂直轴风力机起动效果改善更为明显。

2.4 讨论

将 Savonius 风轮与采用不同叶片翼型的直线翼垂直轴风力机组合,起动性均得到了不同程度的提高,说明了组合法的有效性。然而,结合角度不同使组合风力机起动特性也产生了很大变化,其主要原

因在于两种风轮叠加后风轮整体流场变化的结果。由文献[12]可知,直线翼垂直轴风力机风轮静态流场与风轮旋转角关系密切,旋转角不同,流经各叶片处的静流场不同,产生的气动力及风轮旋转静力矩也不同,这体现了直线翼垂直轴风力机起动特性的旋转角依赖性。同样,Savonius 风轮的起动特性更是随旋转角度的不同而变化^[7]。因此,将两者结合后,由于结合角度不同,外侧的直线翼叶片对流入内部的 Savonius 风轮叶片流场的干涉程度不同,使流入 Savonius 风轮内部的流体变化,从而影响了 Savonius 风轮对整机起动性的改善。同时,流出 Savonius 风轮后的流体也会影响流入后部直线翼叶片的流体,这种影响也会因结合角度的不同而不同。另外,叶片翼型的不同会更加影响上述的流场特性的变化。

3 结论

(1)将 Savonius 风轮与直线翼垂直轴风力机组合可以改善直线翼垂直轴风力机的起动性,采用非对称翼型风力机的改善效果较明显。

(2)对于 NACA0018 对称翼型的直线翼垂直轴风力机,采用直线翼垂直轴风力机最佳起动区域与 Savonius 风轮最佳起动区域的结合方法可以更好地提高组合型垂直轴风力机的起动性。采用直线翼垂直轴风力机最差起动区域与 Savonius 风轮最佳起动区域相结合的方法,也可以提高起动性,但改善率相对较低。

(3)对于采用非对称翼型 FX63-145 的直线翼垂直轴风力机,两种组合方式各有优缺点。从平均改善率角度来看,宜采用直线翼垂直轴风力机最佳起动区域与 Savonius 风轮的组合;从最大改善率以及改善位置比例来看,宜采用直线翼垂直轴风力机最差起动区域与 Savonius 风轮的组合。

参 考 文 献

- Islam M, David S, Ting K, et al. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(4): 1 087 ~ 1 109.
- 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 for 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)
- Paraschivoiu I. Wind turbine design with emphasis on darrieus concept [M]. Montreal: Ecole Polytechnique de Montreal, 2002.
- 李岩,原丰,林农. Savonius 风轮叶片重叠比的风洞试验研究[J]. 太阳能学报,2009,30(2):226~231. Li Yan, Yutaka Hara, Tsutomu Hayashi. A wind tunnel experimental study on the overlap ratio of Savonius rotors [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2009, 30(2):226 ~ 231. (in Chinese)
- 赵振宙,郑源,徐小韵,等. 基于部分结构参数的螺旋形 Savonius 风轮性能优化[J]. 太阳能学报,2010,31(11):1 480 ~ 1 484.

- 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)