文章编号: 0258-1825(2016)05-0568-05

小型垂直轴风力机叶片结冰风洞试验与数值计算

李 岩^{1,*},刘钦东¹,王绍龙¹,冯 放²,田川公太朗³

(1. 东北农业大学 工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;
 3. 日本鸟取大学 地域学部, 鸟取 6808551)

摘 要:利用风洞试验和数值模拟相结合的手段,研究了小型垂直轴风力机叶片在旋转状态下的结冰特性以及结冰后翼型与风力机的气动特性变化,以期为建立较复杂的大型水平轴风力机叶片旋转试验系统和研究其结冰机理、防除冰技术提供参考。试验在东北农业大学自行设计的利用自然低温的结冰风洞中进行,获得了采用 NACA0018翼型的小型2叶片垂直轴风力机风轮在5种尖速比下的结冰分布:风力机叶片结冰遍布叶片整个表面,随着尖速比的增大,结冰形状出现不对称性。同时,数值模拟结果表明:叶片结冰后,随着尖速比的增加和结冰量的增多,升力系数降低阻力系数增大的趋势明显,风力机的功率系数也随之下降。分析发现,叶片结冰导致不同旋转角下叶片翼型周围的压力场和速度场发生了不同程度的变化,从而气动特性发生变化,影响了风力机性能。 关键词:结冰;垂直轴风力机;旋转叶片;风洞试验;数值模拟

中图分类号:V211.753 文献标识码:A doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0214

Wind tunnel test and numerical simulation on blade icing of small-scaled vertical axis wind turbine

Li Yan^{1,*}, Liu Qindong¹, Wang Shaolong¹, Feng Fang², Tagawa Kotaro³

Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
 College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

3. Regional Faulty, Tottori University, Tottori 6808551, Japan)

Abstract: The icing characteristics of rotating blade of a small-scaled Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) and the aerodynamics performance changes of the iced blade airfoil and rotor were researched by wind tunnel tests and numerical simulation in order to provide technology reference for establishing the more complex test system for large scale Horizontal Axis Wind Turbine with rotating blade and study the icing mechanism and anti-icing and de-icing technology. The experiments were performed in an icing wind tunnel designed by Northeast Agricultural University using natural low temperature in cold winter. The test model was a small-scaled VAWT with 2 blades with NACA0018 airfoil. The icing accretions on rotating blade surface under 5 tip speed ratios were tested and recorded. Wind turbine blades were frozen over the entire surface of the blade. Ice shape asymmetry can be found on the blade with the increasing of tip speed ratio and the amount of ice based on the results of numerical simulation. The power coefficients of the rotor were also decreased. It can be also found that the change degree of pressure field and velocity field around the iced blade depended on rotating angles, which was the main reason affecting the aerodynamic performance of blade and the turbine.

Keywords: icing; vertical axis wind turbine; rotating blade; wind tunnel test; numerical simulation

收稿日期:2015-12-18; 修订日期:2016-01-14

基金项目:国家自然科学基金(51576037)

作者简介:李岩*(1972-),男,黑龙江宾县人,教授,研究方向:可再生能源综合利用. E-mail:liyanneau@163.com

引用格式:李岩,刘钦东,王绍龙,等.小型垂直轴风力机叶片结冰风洞试验与数值计算[J]. 空气动力学学报,2016,34(5):568-572,586. doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0214 Li Y, Liu Q D, Wang S L, et al. Wind tunnel test and numerical simulation on blade icing of small-scaled vertical axis wind turbine[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2016, 34(5):568-572,586.

0 引 言

近年来,寒冷气候条件对风力机的影响受到了国际风能界的广泛关注^[1-6],研究风力机叶片结冰特性与防除冰技术成为了热点领域^[7]。当前国内外风力 机叶片结冰的主要研究方法是结冰风洞试验与数值 模拟计算。大部分研究主要是针对静止叶片翼型的 二维结冰和小型水平轴风力机静态结冰^[8-12]。对于 大型风力机的旋转叶片的结冰试验研究还未见报道, 主要原因:一是尚未建立合理有效的结冰实验相似准 则;二是冰风洞试验成本较高使得这方面的研究开展 受到一定的限制。

本研究对风力机结冰试验研究进行了新的探索。 首先尝试了利用北方寒冷地区的自然低温实现在常 规风洞中进行结冰试验。通过前期研究确认了该方 法的可行性[13],研究小型直线翼垂直轴风力机叶片 在静态[14-15] 与旋转状态下的结冰特性。选取该种风 力机为研究对象的主要原因有两个,一是这种风力机 是目前国内外新型小型风力机的代表,研究其结冰特 性有一定的实用价值;二是该种风力机叶片简单,没 有水平轴风力机叶片变截面等变化,旋转状态下的叶 片结冰特性较易通过实验获得。因此,可先通过研究 这种风力机叶片结冰的试验方法与特性,为探索建立 较复杂的大型水平轴风力机叶片旋转试验系统提供 参考,为研究水平轴风力机旋转叶片结冰机理及风力 机防除冰技术提供借鉴。通过实验测试了不同尖速 比下叶片结冰分布,其后将结冰后的翼型进行数值模 拟计算,分析叶片及风轮的气动特性变化,并从流场 改变的角度分析气动特性变化原因,为叶片防除冰技 术提供依据。

1 实验装置与方法

1.1 风力机模型

根据实验室风洞条件,设计了一台小型直线翼垂 直轴风力机,如图1所示。风轮直径为440mm。叶 片采用了直线翼垂直轴风力机常用的NACA0018 翼



型,叶片个数为2,材质为玻璃钢,长度为250mm,弦 长为125mm。

1.2 结冰试验系统与测试方法

本研究试验在东北农业大学自行设计的利用自 然低温的结冰风洞^[13]中进行,结冰试验段截面为 0.6 m×0.6m,风速范围为 1~15m/s。为模拟室外结冰 环境,在吹出口处安装了水雾喷射系统提供结冰条 件。图 2 为风洞试验系统示意图。



试验条件如下:*LWC*(Liquid Water Content, ISO 12494 中规定大气中物体结冰时的水滴含量参 数)为 2.32 g/m³;*MVD*(Median Volume Droplet, ISO 12494 中规定大气中物体结冰时的水滴粒子大 小的参数)约为 40 μ m;温度在 $-12 \degree \Xi - 7 \degree C$ 之间; 风速为 4 m/s;风力机旋转尖速比为五种:0.2、0.4、 0.6、0.8、1.0。在固定转速下,利用安装在风轮上方 的高速摄影记录旋转状态下的叶片表面结冰。

2 数值模拟方法

2.1 气动参数

计算涉及的叶片及风力机气动参数定义如下:

升力系数:
$$C_L = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho A U^2}$$
 (1)

阻力系数:
$$C_D = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho A U^2}$$
 (2)

式中, ρ 为空气密度,1.225 kg/m³;A 为物体相对来 流的投影面积,m²;U 为来流速度,m/s。

尖速比:
$$\lambda = \frac{V}{U} = \frac{\omega R}{U}$$
 (3)

即叶片尖端线速度与风速之比。式中,V 是旋转 的风力机风轮外径切线速度,m/s;U 是风进叶轮前 的速度,m/s;ω为风力机旋转角速度,rad;R 为风轮 半径,m。

力矩系数:
$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho A R U^2}$$
 (4)

式中,*M* 为力矩,N•m;*A* 为物体相对来流的投影面积,m²。

风能利用系数: $C_{\rho} = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho A U^3}$ (5)

其中 p 为压力, Pa。

2.2 求解方程

因为测试的空气的雷诺数和马赫数都很小,所以 可以被视为不可压缩流体。数值模拟是基于二维不可 压缩流 N-S方程,连续性方程和动量方程如下所示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_{j})}{\partial x_{j}} = 0$$
(6)
$$\frac{\partial (\rho u_{i})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_{i} u_{j})}{\partial x_{j}} =$$

$$\frac{\partial \left[\mu_{e} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) \right]}{\partial x_{j}} - \frac{\partial P}{\partial x_{i}} + S_{i}$$
(7)

式中,x_i、x_j分别为方向矢量;u_i、u_j分别为速度矢量。

将实验得到的二维叶片结冰形状进行数字化处 理后导入流场中,网格划分如图 3 所示。



Fig. 3 Mesh around test model

3 结果与分析

3.1 结冰试验结果

图 4 所示为尖速比在 0.2、0.6、1.0 时叶片在 30 min 过程中的结冰情况。由图可知,直线翼垂直轴风 力机叶片结冰是遍布叶片整个表面的,随着时间的增 加,叶片结冰逐渐增厚,且结冰在叶片表面分布较为 均匀。随着尖速比的增大,结冰形状出现了一定的不 对称性,在叶片尾缘外侧以及前缘内侧结冰情况更加 明显。



图 4 不同尖速比下 30 min 内叶片表面结冰分布 Fig. 4 Ice accretion on blade surface during 30 minutes at different tip speed ratios

3.2 数值模拟结果

将上述结冰后的翼型进行数字化处理,对结冰前 后的叶片升阻力系数、风力机功率系数、力矩系数以 及叶片周围流场等进行了数值模拟计算。图 5 和图 6 给出了结冰叶片的升力和阻力系数的变化,图 7 给 出了风力机功率系数的变化情况。

由图 5 和图 6 可知,随着时间的增加,结冰量越 大的情况下,叶片的升力系数呈明显下降趋势,而阻 力系数则明显增大。随着结冰量的增加,升力的改变 有一定的波动性,但整体趋势一致。而阻力系数的降 低基本上是随时间呈线性增加。由此可知,结冰后的 叶片气动特性整体下降。



从图 7 可知,叶片结冰后风力机功率系数在各个 尖速比下都不同程度下降。由于尖速比在 0.2 时的 风力机功率系数较小,所以结冰后的功率系数变化不 大。当尖速比在 0.4 至 0.8 时,在前 5 分钟内随着结 冰的出现,使得风力机功率系数迅速下降,然后随着 结冰的增加,风力机的功率变化维持在一定的水平。 而当在尖速比为 1.0 时,可以明显的看出风力机的功 率系数随结冰量的增加而下降。结冰 30 min 的实验 模型与未结冰的实验模型相比较,功率系数下降了 37%。由此可知,叶片结冰后风力机将不能按照原来 的设计输出功率,甚至要停机。



Fig. 7 Power coefficient of wind turbine with iced blade

为了进一步分析叶片结冰后对风力机气动特性 影响的机理,计算了叶片结冰后风轮在旋转一周内的 力矩系数变化,如图 8 所示。

由图 8 可知在未结冰时,风轮的力矩系数基本上 都为正值,只有在攻角为 110°到 155°之间为负值。 然而,叶片结冰后,风轮旋转一周内的负力矩范围明 显增多,且随着时间的增加和结冰量的增大,负力矩 的范围和程度均呈增大的趋势。结冰 30 min 分钟的 风轮力矩系数的影响最大。

为了进一步分析影响机理,针对结冰 30 min 叶 片和无结冰叶片风力机,选取三个典型的方位角 0°、 70°、120°,计算了结冰前后叶片周围的流场和压力 场,如图 9~图 11 所示。



图 8 有无结冰风轮旋转一周内力矩变化(λ =1.0) Fig. 8 C_m of rotors with and without icing on blade (λ =1.0)





由图 9 可知,由于上面的叶片前缘结冰的存在导 致前缘附近形状变化,使得背面出现了较大的流动分 离,从而影响到整个叶片周围的流场。这一变化直接 导致该叶片周围压力场的变化,较大的流动分离使得 背面压力增大,腹面压力降低,从而导致升力下降,阻 力升高。而对于图中下面叶片来说,由于尾缘在前, 结冰对其产生的影响相对较小;同时,在 180°时叶片 的升阻力特性原本也相对较差,因此,结冰对该叶片 的影响程度相对较小。因此,在这一状态下,风力机 的整体气动特性较结冰前大幅下降。

由图 10 可以看出,无论是速度场还是压力场,叶 片结冰前后的流场变化并不是十分显著,这与图 8 中 给出的风轮力矩变化情况基本一致。主要的变化还 是来自左上方叶片结冰所产生叶片周围流场变化。 可以看到在该叶片腹面,由于结冰导致分离区增大, 上下面的压力变化增大,影响了升力的发挥。而右下 侧叶片周围的压力场也发生了一定的变化,因此从总 体上影响了风力机的气动特性。

由图 11 可知,结冰导致左下方叶片背面的压力 显著增大,以及右上方叶片前缘附近的压力增大。在 结冰时,该状态下的风力机力矩为负值,因此,结冰后 导致负力矩进一步加大,使得风力机的气动特性进一 步恶化。







图 11 结冰前后叶片周围流场(α=120°)

Fig. 11 Flow field around blade with or without icing($\alpha = 120^{\circ}$)

4 结 论

本文通过试验测试了不同尖速比下叶片结冰分 布,并对结冰后的翼型进行了数值模拟计算,分析了 叶片及风轮的气动特性变化,得到了如下结论:

 1)试验结果表明,采用对称翼型的直线翼垂直 轴风力机旋转叶片的结冰在尖速比较小时均匀分布 在整个叶片表面,随着尖速比增大,冰层逐渐增厚,由 于旋转效应使结冰出现一定的不对称性,在叶片尾缘 外侧及前缘内侧的结冰不对性较明显。

 2) 计算结果表明,旋转叶片结冰后的升力系数 降低,阻力系数增大,风轮功率系数下降,这种趋势随 尖速比的增加和结冰量增多而更加显著。

3)结冰后叶片翼型周围流场发生改变,其变化 程度与风轮旋转角相关,这是导致结冰后的叶片气动 特性变化与风力机性能降低的主要原因。

参考文献:

- [1] Kimura S, Sato T, Tsuboi K, et al. Numerical simulation of ice accretion on a wind turbine blade [J]. Journal of the Japanese Society of Snow & Ice, 2006, 68(5): 393-407.
- [2] Mróz A, Holnicki-Szulc J, Kärnä T. Mitigation of ice loading on off-shore wind turbines: feasibility study of a semi-active solution[J]. Computers & Structures, 2008, 86(s 3-5); 217-226.
- [3] Virk M S, Homola M C, Nicklasson P J. Relation between angle of attack and atmospheric ice accretion on large wind turbine's blade[J]. Wind Engineering, 2010, (6): 607-614.
- [4] Kraj A G, Bibeau E L. Impact of mitigation strategies on icing accumulation rate for wind turbines in cold climates[R]. Wind Energy-Technological Advances, 2007.
- [5] Kraj A G, Bibeau E L. Measurement method and results of ice adhesion force on the curved surface of a wind turbine blade[J]. Renewable Energy, 2010, 35(4): 741-746.
- [6] Homola M C, Virk M S, Nicklasson P J, et al. Performance lossesdue to ice accretion for a 5MW wind turbine [J]. Renewable Energy, 2012, 15, 379-389.
- Bose Neil. Icing on a small horizontal axis wind turbine-Part 1: Glaze ice profiles [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 45(1): 75-85.
- [8] Kraj A G, Bibeau E L. Phases of icing on wind turbine blades characterized by ice accumulation [J]. Renewable Energy, 2010, 35(5): 966-972.
- [9] Han Yiqiang, Jose Palacios, Sven Schmitz. Scaled ice accretion experiments on a rotating wind turbine blade [J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 109 (11): 55-67.
- [10] Yi Xian, Zhu Guoling. Computation of glaze ice accretion on airfoil[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2004, 22(4): 490-493. (in Chinese)
 易贤,朱国林.考虑传质传热效应的翼型积冰计算[J]. 空气动 力学学报, 2004, 22(4): 490-493.
- [11] Zhu Chengxiang, Wang Long, Fu Bin. Numerical study of wind turbine blade airfoil ice accretion[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(4): 522-528. (in Chinese) 朱程香,王珑,付斌. 风力机叶片翼型的结冰数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 522-528.
- [12] Deng Xiaohu, Lu Xuxiang, Li Luping. Numerical simulation of airfoil ice accretion process on horizontal-axis wind turbine blade
 [J]. Energy Technology, 2010, 31(5): 266-271. (in Chinese)
 邓晓湖,卢绪祥,李录平.水平轴风力机叶片翼型结冰的数值
 模拟[J]. 能源技术, 2010, 31(5): 266-271.
- [13] Li Y, Wang S L, Zheng Y F, et al. Design of wind tunnel experiment system for wind turbine icing by using natural low temperature[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(2): 54-58, 66. (in Chinese)

马家驩,潘文欣,翟曼玲,等.10°尖锥标模高超声速动导数的 实验测量[J].空气动力学学报,1997,15(4):452-457.

[2] Jiang Zenghui, Chen Nong. Wind tunnel free-flight test with biplanar optical system on the spinning blunt cone[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(5): 777-781. (in Chinese)

蒋增辉, 陈农.旋转钝锥双平面拍摄风洞自由飞试验[J].力学 学报, 2013, 45(5): 777-781.

- [3] Lewis H O, East R A. Measurement of free-flight dynamic stability derivatives of cones in a hypersonic gun tunnel. AIAA-95-6082[R]. Reston: AIAA, 1995.
- [4] Xu Kefa, Wang Lingzhi, Li Mingjuan, et al. Research on dynamic derivative of Spinning missile by six-degree-of-freedom free-flight test in wind tunnel[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1993, 11(3): 257-262. (in Chinese) 许可法,王陵志,李明娟,等. 旋转导弹风洞六自由度自由飞 动导数实验研究[J]. 空气动力学学报, 1993, 11(3): 257-262.
- [5] Prislin R H, Holway H P. A wind tunnel free flight testing technique for nonplanar motion of spinning models. AIAA 66-774[R]. Reston: AIAA, 1966.
- [6] Jaffe P. Nonplanar tests using the wind-tunnel free-flight technique[J]. J. of Spacecraft, 1973, 10(7): 435-442.
- [7] Prislin R H. High-amplitude dynamic-stability characteristics of blunt 10-degree cones [C]//AIAA 4th Aerospace Sciences Metting, AIAA-66-465, 1966.
- [8] Ingram C W, Nicolaides J D. Obtaining nonlinear aerodynamic stability coefficients from free-angular motion of rigid bodies [J]. J. of Spacecraft, 1969, 8(4): 390-395.
- [9] Nicolaides J D, Ingram C W, Martin J M. Nonlinear aerodynamic stability characteristics of the 2. 75 wrap-around fin configuration[C]//8th Navy Symposium on Aeroballistics, 1969, 3: 751-832.
- [10] Nicolaides J D, Eikenberry R S, Ingram C W, et al. Flight dynamics of the basic finner in various degrees of freedom[R]. AFATL TR-68-32, 1968

- [11] Xu Kefa, He Longde, Li Mingjuan, et al. Experimental investigation of dynamic stability derivatives at high angle of attack in wind tunnel free-flight [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(8): B394-B397. (in Chinese) 许可法,何龙德,李明娟,等. 大攻角风洞自由飞动导数实验 研究[J]. 航空学报, 1993, 14(8): B394-B397
- [12] Holden M S , Harvey J, Maclean M, et al. Development and application of a new ground test capability to conduct full-scale shroud and stage separation studies at duplicated flight conditions. AIAA 2005-696[R]. Reston: AIAA, 2005.
- [13] Holden M S, Smolinski G J, Mundy E, et al. Experimental studies for hypersonic vehicle design and code validation of unsteady flow characteristics associated with free flight shroud and stage seperation and mode switching. AIAA 2008-642[R]. Reston: AIAA, 2008.
- [14] Ma Jiahuan, Tang Zongheng, Zhang Xiaoping, et al. Wind tunnel free-flight test on shell separation[R]. IMCAS Report, 1983. (in Chinese)
 马家驩,唐宗衡,张小平,等. 抛壳方案的模型自由飞试验 [R]. 中国科学院力学研究所报告, 1983.
- [15] Zhang Wanqiang. Free-flight test on the separation between nosetip and afterbody of warhead in the shock tunnel [R]. China Aerodynamics Research and Development Centre Report, 1980. (in Chinese)
 张晚清. 战斗部的端头与后体分离方案激波管风洞自由飞试验 研究[R]. 中国空气动力研究与发展中心报告, 1980.
- [16] Li Zhoufu. Wind tunnel special tests technique[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010: 88-161. (in Chinese) 李周复.风洞特种试验技术[M].航空工业出版社,北京, 2010: 88-161.
- [17] Ren Huaiyu, Zhang Duo. Research on simulation of the dynamic performance for thermal separation of multistage missile [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(4): 509-513. (in Chinese) 任怀宇,张铎. 导弹级间热分离动态特性仿真研究[J]. 宇航学 报, 2005, 26(4): 509-513.

(上接第 572 页)

李岩,王绍龙,郑玉芳,等.利用自然低温的风力机结冰风洞 实验系统设计[J].实验流体力学,2016,30(2):54-58,66.

[14] Li Yan, Chi Yuan, Feng Fang. Wind tunnel test on icing on blade used for vertical axis wind turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33 (11): 1872-1875. (in Chinese) 李岩,迟媛,冯放. 垂直轴风力机叶片表面结冰的风洞试验 [J]. 工程热物理学报,2012,33(11):1872-1875.

[15] Li Yan, Tagawa Kotaro, Feng Fang, et al. A wind tunnel experimental study of icing on wind turbine blade airfoil[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 85(9); 591-595.