

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<sup>1,\*</sup>, 刘钦东<sup>1</sup>, 王绍龙<sup>1</sup>, 冯放<sup>2</sup>, 田川公太朗<sup>3</sup>

(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<sup>1,\*</sup>, Liu Qindong<sup>1</sup>, Wang Shaolong<sup>1</sup>, Feng Fang<sup>2</sup>, Tagawa Kotaro<sup>3</sup>

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

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

3. Regional Faculty, 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. Furthermore, the lift coefficient of iced blade decreased and drag coefficient increased 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<sup>[1-6]</sup>,研究风力机叶片结冰特性与防除冰技术成为了热点领域<sup>[7]</sup>。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<sup>[8-12]</sup>。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<sup>[13]</sup>,研究小型直线翼垂直轴风力机叶片在静态<sup>[14-15]</sup>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440 mm。叶片采用了直线翼垂直轴风力机常用的NACA0018翼

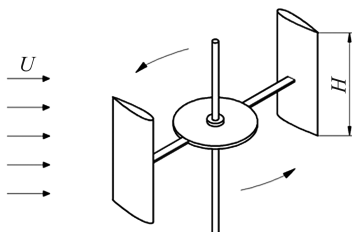


图1 试验风力机模型

Fig.1 Wind turbine model for test

型,叶片个数为2,材质为玻璃钢,长度为250 mm,弦长为125 mm。

### 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<sup>[13]</sup>中进行,结冰试验段截面为0.6 m×0.6 m,风速范围为1~15 m/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。

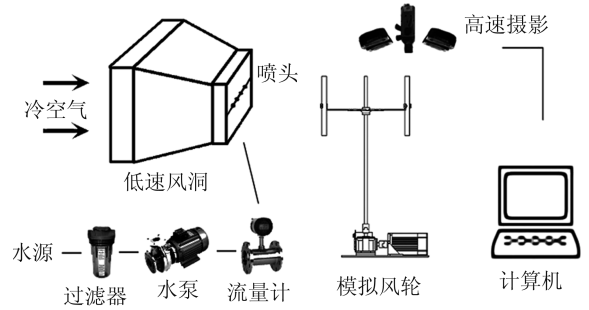


图2 测试系统

Fig.2 Test system

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/m<sup>3</sup>;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 μm;温度在-12℃至-7℃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:

$$\text{升力系数: } C_L = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho AU^2} \quad (1)$$

$$\text{阻力系数: } C_D = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho AU^2} \quad (2)$$

式中, $\rho$ 为空气密度,1.225 kg/m<sup>3</sup>;A为物体相对来流的投影面积,m<sup>2</sup>;U为来流速度,m/s。

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

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; $\omega$ 为风力机旋转角速度,rad;R为风轮半径,m。

$$\text{力矩系数: } C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho ARU^2} \quad (4)$$

式中,  $M$  为力矩,  $N \cdot m$ ;  $A$  为物体相对来流的投影面积,  $m^2$ 。

$$\text{风能利用系数: } C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (5)$$

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[ \mu_c \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + S_i \quad (7)$$

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。

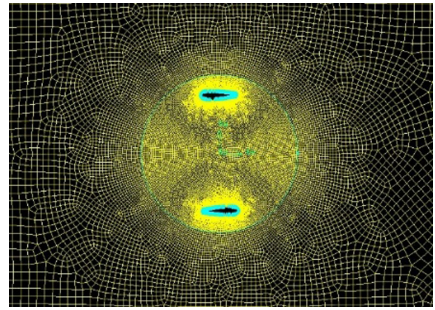


图 3 模型网格

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。

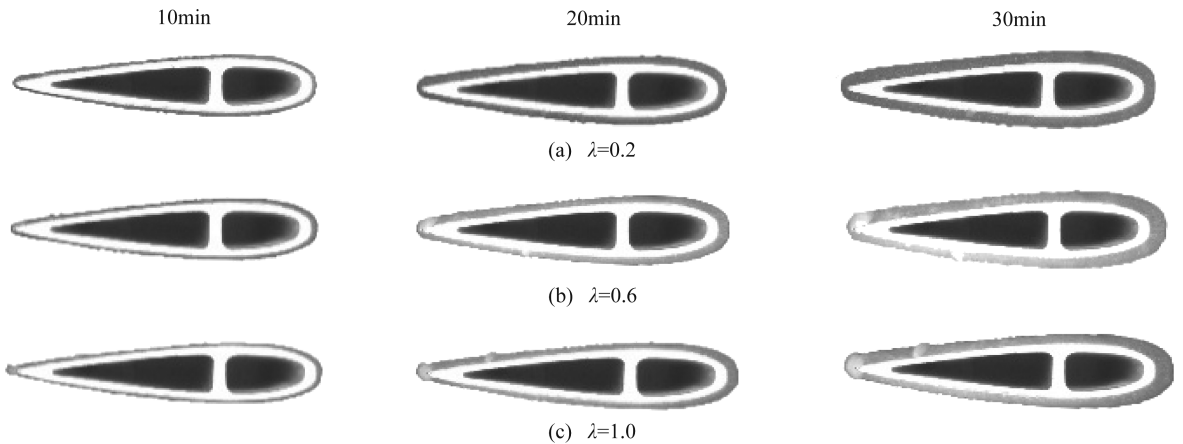


图 4 不同尖速比下 30 min 内叶片表面结冰分布

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。

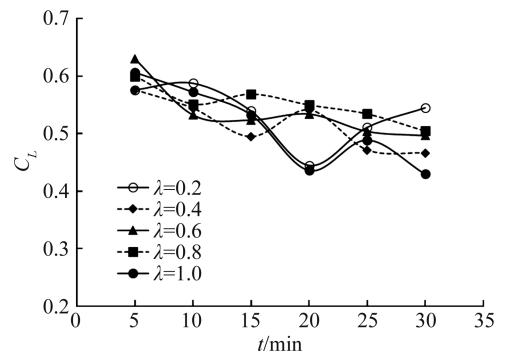


图 5 结冰后叶片升力系数

Fig. 5 Lift coefficient of iced airfoil

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。

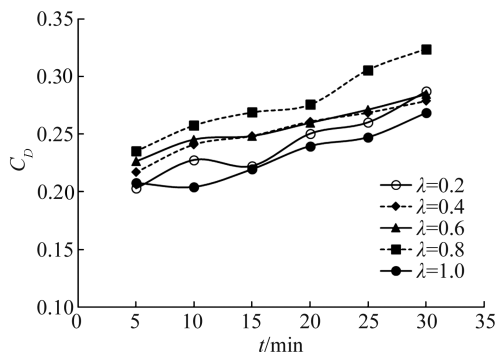


图 6 结冰后叶片阻力系数

Fig. 6 Drag coefficient of iced airfoil

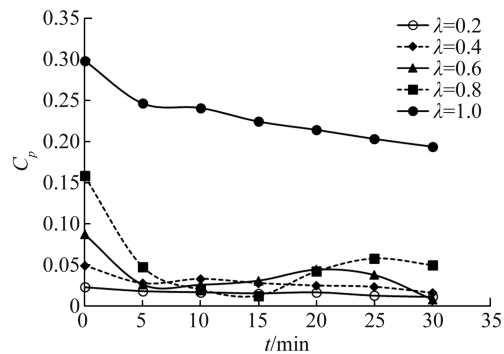


图 7 风力机功率系数

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。

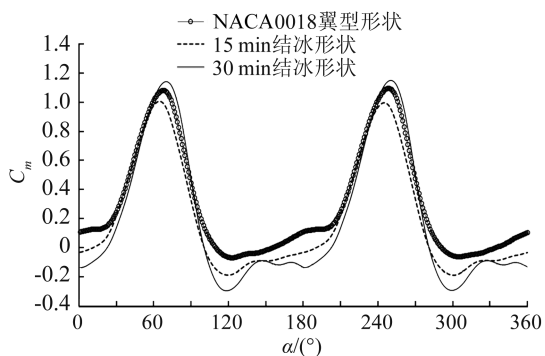


图 8 有无结冰风轮旋转一周内力矩变化( $\lambda=1.0$ )

Fig. 8  $C_m$  of rotors with and without icing on blade ( $\lambda=1.0$ )

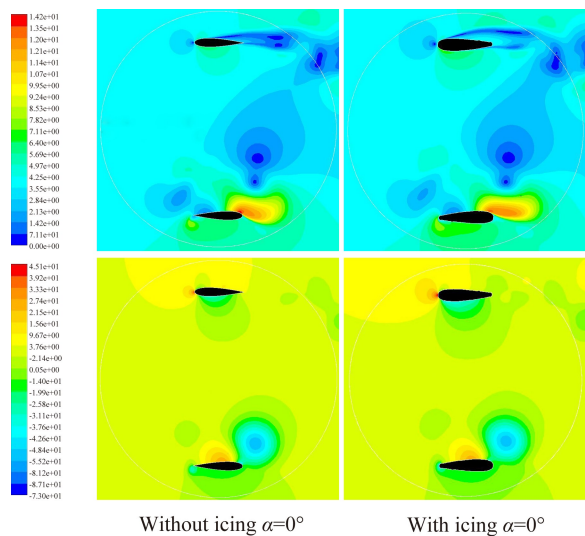


图 9 结冰前后叶片周围流场( $\alpha=0^\circ$ )

Fig. 9 Flow field around blade with or without icing( $\alpha=0^\circ$ )

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。

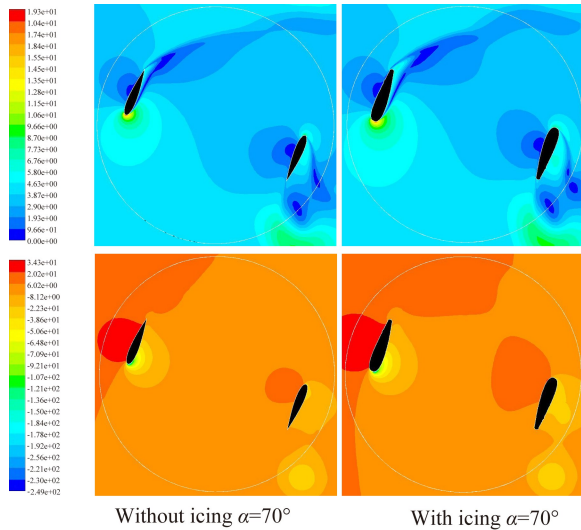


图 10 结冰前后叶片周围流场 ( $\alpha=70^\circ$ )

Fig. 10 Flow field around blade with or without icing ( $\alpha=70^\circ$ )

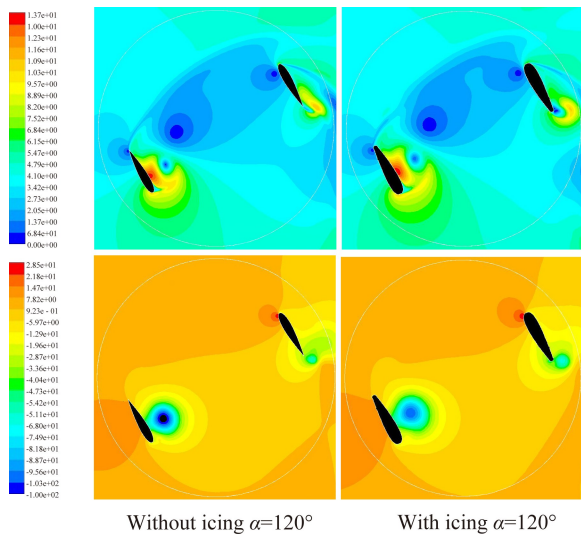


图 11 结冰前后叶片周围流场 ( $\alpha=120^\circ$ )

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称性较明显。

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 losses due to ice accretion for a 5 MW wind turbine [J]. Renewable Energy, 2012, 15, 379-389.
- [7] 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)

