

NREL 5 MW 风力机叶片外部翼型结冰模拟

杜静宇¹, 胡良权², 任鑫¹, 沈昕²

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院, 北京 102209; 2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 该文首先建立欧拉法水滴收集系数模型和风力机叶片翼型结冰模型,并以 NACA0012 翼型结冰算例验证该模型的有效性,而后开展 NREL 5 MW 风力机叶片外部翼型(NACA64618)结冰数值模拟,对风速、液态水含量和水滴直径等参数在结冰速率的影响方面进行了讨论。数值模拟结果表明:随攻角增大,NACA64618 翼型结冰区域移向压力面,结冰厚度增加(最大增加量约为 167%);增大风速、液态水含量和水滴直径均加剧 NACA64618 翼型结冰,结冰区域扩大、结冰量与结冰厚度增加。

关键词: 风力机; 叶片; 翼型; 结冰; 数值模拟; 水滴撞击特性
中图分类号: TK83 **文献标志码:** A

0 引言

高海拔、低温区域风能资源更为充裕,风力机组常安装在高地山区^[1]。但这些地区气候恶劣、湿度大、常出现冻雨冻雪等现象,导致风力机叶片极易结冰^[2-4]。这一现象不仅使叶片气动外形发生改变,令气动性能恶化,阻力系数升高、升力系数降低、失速攻角提前^[5-10],还会降低机组运行稳定性^[11]。

国内外已有许多学者开展了风力机叶片结冰的相关实验与仿真研究。

在实验研究方面,Barber 等^[12]研究不同叶片结冰位置对风力机气动性能的影响程度,发现叶尖区域结冰影响最大,因此对叶片外部结冰研究是相关研究的重点。李岩等^[13]实验研究垂直轴风力机结冰性质,考察了迎风面积对叶片结冰量的影响。文献^[14]开展 NREL Phase VI 型风力机结冰实验,并使用 LEWICE 软件对冰形进行预测,指出预测冰形与实验冰形仍有差异。这些研究指明了风力机叶片结冰关键部位,实验研究了结冰的部分影响参数,是开展结冰数值模拟的重要参照。

在仿真研究方面,易贤等^[15]针对水平轴风力机开发三维结冰模拟程序,指出叶尖结冰量最大,说明叶片结冰应更关注叶尖部位,这与 Barber 等人的实验结论一致。Pedersen 等^[16-17]基于 ANSYS Fluent 的多相流模型和动网格重构几何技术开展二维翼型结冰研究,并模拟了结霜冰的情况。邓晓湖等^[18]建立水滴收集系数的拉格朗日法计算模型,并模拟了翼型结霜冰外形。Homola 等^[19]使用 TURBICE 软件对结冰后的翼型外形特点及其气动性能变化进行分析。任鹏飞等^[20]针对

NREL Phase VI 型风力机开展叶片结冰数值模拟,分析了霜冰对该风力机性能的影响。这些研究分析了风力机叶片结冰的基本原理,建立了叶片结冰数值模拟的基本流程方法,并完成了部分翼型的结冰模拟,探讨了结冰对翼型气动性能的影响;但目前的研究尚未形成较通用的结冰数值仿真模型,对于结冰的影响因素研究还不够深入。

本文首先采用欧拉法建立水滴收集系数计算模型,在此基础上建立翼型结冰模型,并以 NACA0012 翼型结霜冰验证此方法的有效性,而后开展 NREL 5 MW 风力机叶片外部翼型(NACA64618)结冰模拟,最后分析风速、水滴直径和液态水含量等参数对结冰的影响。

1 水滴收集系数模型建立与验证

1.1 水滴撞击特性

在寒冷潮湿的条件下,湿空气中携带的过冷液滴易在风力机运行的叶片前缘发成撞击。通常,把水滴在叶片/翼型前缘的撞击范围、撞击水量和水量的分布等统称为水滴撞击特性^[21]。水滴撞击特性的求解是后续结冰模拟的前提。

水滴收集系数 β 是表征水滴撞击特性的关键参数,其定义为翼型表面局部区域实际水滴撞击量与最大可能水滴撞击量之比。水滴收集系数体现翼型表面的水滴收集能力,反映水滴在翼型表面的分布情况。

1.2 欧拉法水滴收集系数模型建立

1.2.1 水滴守恒方程

水滴守恒方程的建立基于以下假设^[22-23]:

收稿日期: 2022-09-14

基金项目: 中国华能集团清洁能源技术研究院青年基金(TO-21-CERI01); 上海市科技创新行动计划(20dz1205300)

通信作者: 杜静宇(1995—), 女, 博士、工程师, 主要从事相变传热方面的研究。jy_du@qny.chng.com.cn

1)空气相与水滴相的相互作用。考虑到水滴体积分数很小,忽略水滴对空气的作用;假设水滴相与空气相不存在质量与热量交换。

2)水滴相的基本状态。假设水滴相是均匀的;假设水滴的初始速度与自由来流速度一致。

基于以上假设,空气相和水滴相实现了解耦^[24],同时可将水滴相视为连续相。设控制体内水滴的体积分数为 α ,则水滴相的连续性方程和动量方程^[25]为:

$$\frac{\partial(\alpha\rho_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_w \mathbf{u}_w) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho_w \mathbf{u}_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_w \mathbf{u}_w \cdot \mathbf{u}_w) = \alpha\rho_w \mathbf{g} + \alpha\rho_w K(\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_w) \quad (2)$$

式中: ρ ——密度,kg/m³; \mathbf{u} ——速度,m/s; \mathbf{g} ——重力加速度,m/s²; K ——空气-水滴动量交换系数^[26]。下标:w——水滴参数;a——空气相参数,下同。

当水滴与翼型表面相撞时,水滴收集系数 β 采用式(3)计算^[25,27]:

$$\beta = \frac{\alpha_n \cdot |\mathbf{u}_n \cdot \mathbf{n}|}{\alpha_\infty \cdot |\mathbf{u}_\infty|} \quad (3)$$

式中: \mathbf{n} ——翼表单位法向量。下标:n——翼型表面处参数; ∞ ——来流参数。

1.2.2 守恒方程求解

通过编写自定义函数(user defined function, UDF), ANSYS Fluent 可求解形如式(4)所示的自定义标量(user defined scales, UDS)方程^[28]。

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t}}_{\text{非稳态项}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \phi_k \right)}_{\text{对流项}} - \underbrace{\Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i}}_{\text{扩散项}} = \underbrace{S \phi_k}_{\text{源项}}, k = 1, \dots, N_{\text{scalar}} \quad (4)$$

水滴守恒方程共包含3个标量: α 、 u_{wx} 和 u_{wy} ,这些参数可看作UDS嵌入到ANSYS Fluent中,然后通过UDS方程进行求解,为此在UDF中共使用5种宏函数,其名称与作用如表1所示。

表1 宏函数及其含义

Table 1 Macros functions and their meanings

宏函数	作用
DEFINE_UDS_UNSTEADY	自定义方程的非稳态项
DEFINE_UDS_FLUX	自定义方程的对流项
DEFINE_SOURCE	自定义方程的源项
DEFINE_PROFILE	计算水滴体积分数边界条件
DEFINE_EXECUTE_AT_END	水滴收集系数执行函数

1.3 水滴收集系数计算方法验证

本文以NACA0012翼型^[27]算例为验证算例,以证明水滴

收集系数欧拉法计算模型的准确性。工况见表2。

表2 NACA0012验证算例的计算工况

Table 2 Calculation conditions for NACA0012

参数变量	参数值
弦长/m	1
自由来流速度/(m/s)	136
攻角(angle of attack, AoA)/(°)	5
压强/Pa	101300
温度/K	300
水滴直径/ μm	16

采用C型拓扑结构化网格,取计算域为10倍翼型弦长,加密近壁面网格。网格无关性验证以升力系数为指标,结果如图1所示。由图1可知,当网格总数大于 1×10^5 时,升力系数的变化很小,达到网格无关性要求。最终采用如图2所示的翼型网格,表面共布置360个网格点,网格数量为 1.24×10^5 。

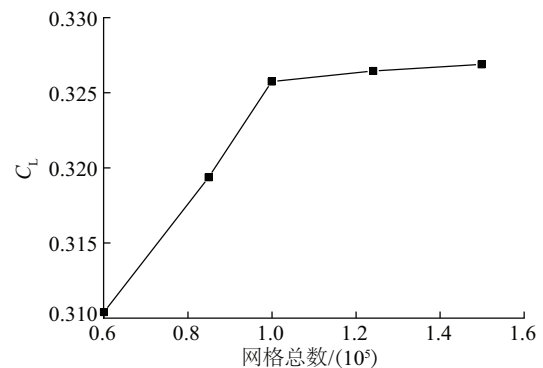


图1 NACA0012翼型网格无关性检验

Fig. 1 Mesh independent validation for NACA0012 airfoil

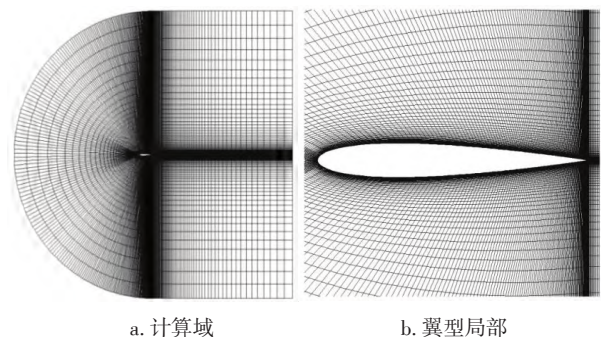


图2 NACA0012翼型计算网格

Fig. 2 Calculation meshes for NACA0012 airfoil

在计算水滴相之前须计算空气相。空气相的数值方法如下:计算采用稳态的压力基求解器,求解算法为二阶迎风网格的SIMPLE算法,湍流模型采用 $k-\omega$ SST模型;边界条件采

用速度进口、压力出口,翼表无滑移,上下边界对称。待空气相计算收敛后,再开展水滴相的求解。水滴相控制方程离散使用二阶迎风格式,以 10^{-8} 为收敛残差。边界条件为:初始进口 $\alpha_\infty = 0.3$ 、 $u_\infty = 135.48 \text{ m/s}$ 和 $u_{wy} = 11.85 \text{ m/s}$, 出口和上下边界参数梯度为零。

图 3 为本方法计算的结果与文献中 NACA0012 水滴收集系数的实验数据对比,图 3 中 x 表示水滴撞击曲线长度, c 表示弦长,以翼型吸力面为正、压力面为负。由图 3 可知,水滴收集系数计算值与实验值和文献值均能较好地吻合。经定量比较,最大水滴收集系数的误差为 3.58%,说明本文采用的水滴收集系数方法具有良好的准确性。

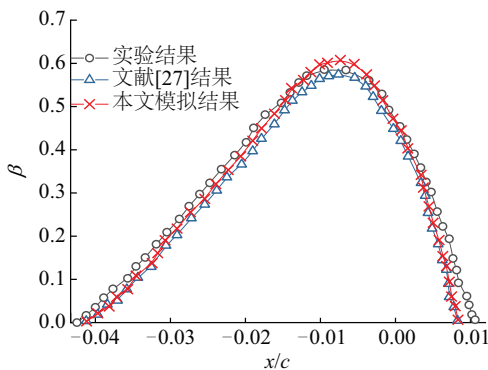


图 3 水滴收集模型的有效性验证

Fig. 3 Validation of droplet collection model

2 翼型结冰模型与验证

2.1 翼型结冰模型

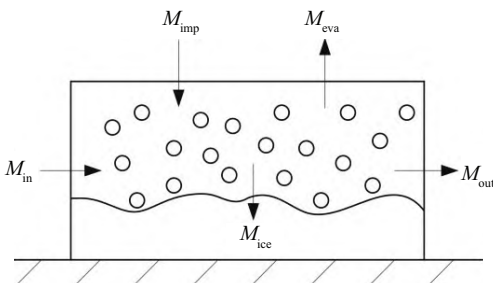
结冰过程中翼型表面任一控制体均遵守质量和能量守恒,其示意图如图 4 所示。

2.1.1 结冰过程中的质量守恒

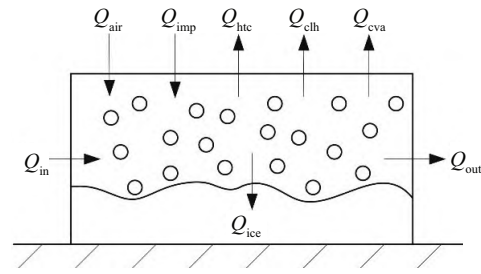
由图 4a 可知,控制体质量守恒方程可表示为:

$$M_{imp} + M_{in} = M_{eva} + M_{out} + M_{ice} \quad (5)$$

式中: M_{imp} —— 撞击水量, kg; M_{in} —— 控制体流入水量, kg; M_{eva} —— 蒸发水量, kg; M_{out} —— 控制体流出水量, kg; M_{ice} —— 结冰水量, kg。式(5)中各子项计算方法参见表 3。



a. 质量传递



b. 能量传递

图 4 控制体质能传递过程示意图

Fig. 4. Schematic diagram of control volume mass and energy transfer process

表 3 质量守恒方程各项计算方法

Table 3 Calculation methods of mass conservation equation

符号	计算方法
M_{imp}	$M_{imp} = \beta u_\infty (\rho_{LWC}) ds$
M_{in}	$M_{in,i} = M_{out,i-1}$
M_{out}	$M_{out,i} = M_{in,i+1}$
M_{eva}	$M_{eva} = \frac{h_c}{R \rho_a c_{p,a} L_{ew}^{2/3}} \left[\frac{p_{sat}(T_s)}{T_s} - \varphi \frac{p_{sat}(T_\infty)}{T_\infty} \right] ds$
M_{ice}	$M_{ice} = f(M_{imp} + M_{in})$

表中: u_∞ —— 来流速度, m/s; ρ_{LWC} —— 液态水含量, g/m^3 ; ds —— 控制体面积, m^2 ; h_c —— 对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; R —— 水蒸气气体常数, $J/(kg \cdot K)$; ρ_a —— 空气密度, kg/m^3 ; $c_{p,a}$ —— 空气定压比热容, $J/(kg \cdot K)$; L_{ew} —— Lewis 数; $p_{sat}(T_s)$ —— 平衡温度 T_s 下的饱和蒸气压, Pa; φ —— 空气相对湿度; $p_{sat}(T_\infty)$ —— 来流温度 T_∞ 下的饱和蒸气压, Pa; f —— 冻结系数, $f = M_{ice} / (M_{imp} + M_{in})$, f 的取值范围介于 0~1 之间。

2.1.2 结冰过程中的能量守恒

由图 4b 可知,控制体能量守恒方程可表示为:

$$Q_{imp} + Q_{in} + Q_{air} = Q_{htc} + Q_{eva} + Q_{clh} + Q_{out} + Q_{ice} \quad (6)$$

式中: Q_{imp} —— 撞击液态水能量, J; Q_{in} —— 控制体流入换热量, J; Q_{air} —— 气动加热量, J; Q_{htc} —— 表面对流传热量, J; Q_{eva} —— 蒸发热量, J; Q_{clh} —— 结冰放热量, J; Q_{out} —— 控制体流出换热量, J; Q_{ice} —— 结冰存储能量, J。式(6)中各子项计算方法参见表 4。

2.2 翼型结冰模型的验证

本文以 NACA0012 翼型^[29] 结冰算例为翼型结冰模型验证算例,结冰条件如表 5 所示。需注意的是,翼型表面的实际结冰过程是瞬态的,但为减少计算消耗,本文中空气和水滴相均采用稳态求解器^[30]。

表4 能量守恒方程各项计算方法

Table 4 Calculation methods of energy conservation equation

符号	计算方法
Q_{imp}	$Q_{\text{imp}} = M_{\text{imp}} \left[c_{p,w} (T_s - T_{\infty}) + \frac{1}{2} u_{\infty}^2 \right]$
Q_{in}	$Q_{\text{in}} = M_{\text{in}} [c_{p,i} T_m + L_f + c_{p,w} (T_m - T_{\text{in}})]$
Q_{out}	$Q_{\text{out}} = M_{\text{out}} [c_{p,i} T_m + L_f + c_{p,w} (T_m - T_s)]$
Q_{air}	$Q_{\text{air}} = \frac{1}{2} h_c r \frac{u_{\infty}^2}{c_{p,a}} ds$
Q_{htc}	$Q_{\text{htc}} = h_c (T_s - T_{\infty}) ds$
Q_{eva}	$Q_{\text{eva}} = M_{\text{eva}} \{ c_{p,i} T_m + L_f + [f c_{p,i} + (1-f) c_{p,w}] (T_m - T_s) + L_c \}$
Q_{ch}	$Q_{\text{ch}} = M_{\text{ice}} L_f$
Q_{ice}	$Q_{\text{ice}} = M_{\text{ice}} c_{p,i} (T_m - T_s)$

表中: $c_{p,w}$ ——水定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $c_{p,i}$ ——冰定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_m ——前一个控制体的表面平衡温度, K ; L_f ——冰融解潜热, J/kg ; r ——附面层恢复系数, 层流时, r 可取为 0.85, 湍流时, r 可取为 0.89; L_c ——水的蒸发潜热, J/kg 。

表5 NACA0012翼型算例结冰条件

Table 5 Icing conditions for NACA0012 airfoil

参数变量	参数值
风速/(m/s)	58.1
弦长/m	0.53
攻角/($^{\circ}$)	4
水滴直径/ μm	20
液态水含量/(g/m^3)	1.3
温度/ $^{\circ}\text{C}$	-27.8
时间/min	6

图5显示了本文模拟结霜冰形状与实验和 LEWICE 预测结果的对比。由图5可知, 总体而言, 本文模拟结果与实验值和 LEWICE 预测结果均能较好地吻合, 且预测精度略超

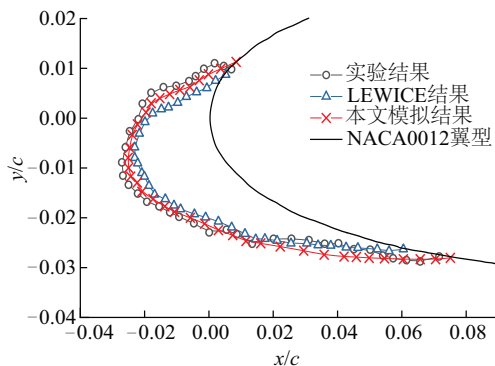


图5 NACA0012翼型结冰对比

Fig. 5 Comparison of icing shapes for NACA0012 airfoil

过 LEWICE。为定量地分析模拟与实验之间的误差, 选取结冰面积和最大结冰厚度作为评价指标, 计算得霜冰的结冰面积误差达 7.59%, 最大结冰厚度误差达 6.64%。综上, 本文建立的结冰数值模型能准确预测翼型结霜冰。

3 NACA64618翼型结冰模拟

实地观测、实验与计算结果均显示外部区域是风力机叶片的最易结冰区, 且该区域对用电端影响较大^[31-32], 因此, 本节以 NREL 5 MW 型风力机叶片外部翼型(NACA64618)为研究对象展开结冰模拟。

3.1 NACA64618翼型水滴收集系数计算

考虑到在实际工作中, 攻角会随风力机变桨而发生变化, 在翼型的结冰模拟中应考虑变攻角条件。因此本文共计算 4 个攻角下(0° 、 4° 、 8° 和 12°)NACA64618 翼型的水滴收集系数, 计算工况如表 6 所示。其中风速为 60 m/s, 雷诺数为 4.1×10^6 , 能满足风力机翼型低雷诺数的要求^[33]。

表6 NACA64618翼型的计算条件

Table 6 Calculation conditions for NACA64618 airfoil

参数变量	参数值
弦长/m	1
风速/(m/s)	60
攻角/($^{\circ}$)	0、4、8、12
环境温度/K	260
水滴直径/ μm	20

NACA64618 翼型的网格划分、数值方法与边界条件设置等与 NACA0012 翼型类似, 在此不再赘述。图 6 为 NACA64618 翼型网格无关性验证结果, 可知网格数量为 0.85×10^5 时已满足无关性要求。图 7 为最终使用的 NACA64618 翼型计算网格, 网格总数为 1.26×10^5 。

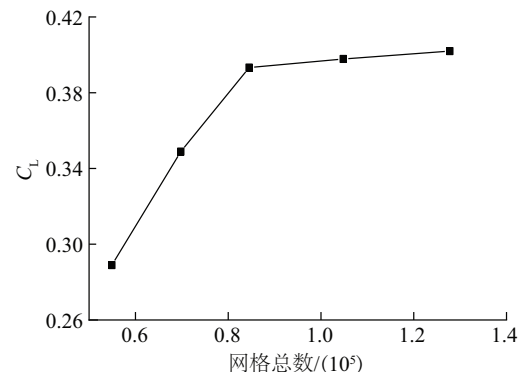
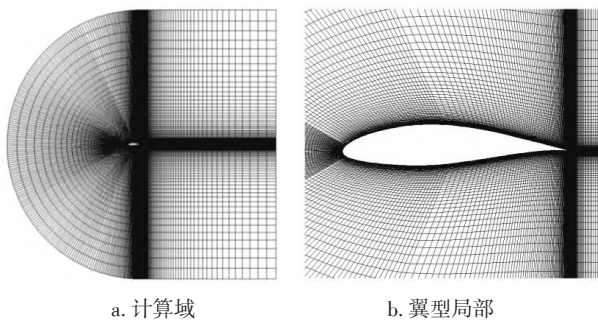


图6 NACA64618网格无关性验证

Fig. 6 Mesh independent validation for NACA64618 airfoil



a. 计算域 b. 翼型局部

图7 NACA64618翼型计算网格

Fig. 7 Calculation meshes for NACA64618 airfoil

图8和表7为攻角 $0^\circ \sim 12^\circ$ 时NACA64618翼型的水滴收集系数计算结果。随攻角增大,水滴收集系数峰值降低,压力面撞击极限增大,吸力面撞击极限减小。当攻角由 0° 增至 12° 时,水滴收集系数峰值降低11.76%,压力面撞击极限增加48.18%,吸力面撞击极限减小84.75%。

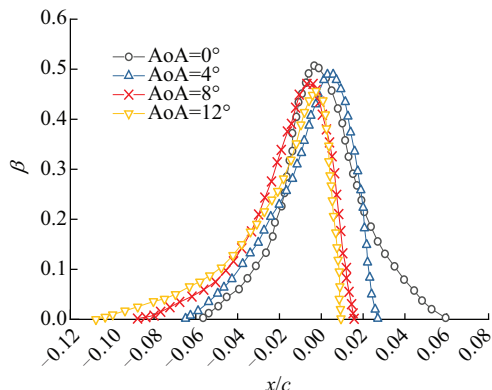


图8 不同攻角条件下的水滴收集系数

Fig. 8 Water droplet collection efficiencies verses different angle of attack

表7 模型的定量分析结果

Table 7 Quantitative analysis results of model

攻角/($^\circ$)	最大水滴收集系数	压力面撞击极限	吸力面撞击极限
0	0.51	0.057	0.059
4	0.49	0.065	0.027
8	0.47	0.087	0.016
12	0.45	0.110	0.009
变化量/%	11.76	48.18	84.75

3.2 NACA64618翼型表面结霜冰模拟

在模拟NACA64618翼型表面结霜冰时,需考虑以下问题:1)计算工况应当是变攻角的,以模拟实际风力机变桨情况;2)风场中叶片表面结冰往往持续几个小时或几天,在数值模拟时需对实际结冰条件进行缩比处理^[34];3)实际结冰参

数是时间和空间的函数,难以精确测量。本文模拟时采用的水滴直径、液态水含量和结冰时间等条件参考Reid等^[35-36]的研究结果,NACA64618翼型结冰的计算时间为20 min,液态含水量为 0.5 g/m^3 ,其他参数与表7相同。

图9显示了不同攻角下NACA64618翼型表面结霜冰形状。由图9可知,攻角由 0° 增至 12° 时,结冰区域移向压力面;结冰厚度增加,最大结冰厚度约增加167%。这是因为翼型表面水滴的附着与收集是结冰的基础条件,水滴撞击极限直接影响结冰范围。由前文可知,攻角增大时,压力面撞击极限增大、吸力面撞击极限减小,因此结冰区域向压力面迁移。

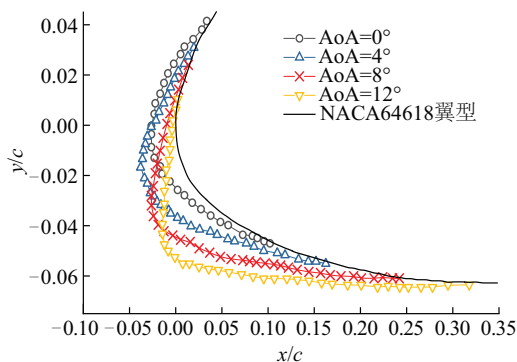


图9 不同攻角条件下的霜冰形状

Fig. 9 Rime ice shapes under different AoAs

3.3 结冰影响参数分析

在风力机实际工作中,风速(wind speed, WS)、水滴直径(medium volume droplet diameter, MVD)和液态水含量(liquid water content, LWC)等是较易发生变化的环境条件^[37],因此本节研究这3种因素对结冰的影响。参考结冰条件如表8所示,除此之外,翼型弦长均为1 m,攻角均为 0° ,温度均为260 K。

表8 风速、水滴直径和液态水含量影响研究计算工况

Table 8 Calculation conditions of WS, MVD and LWC

算例代号	风速/(m/s)	水滴直径/ μm	液态水含量/ (g/m^3)
WS-1	40	20	0.50
WS-2	60		
WS-3	80		
MVD-1	60	10	0.50
MVD-2		20	
MVD-3		30	
LWC-1	60	20	0.25
LWC-2			0.50
LWC-3			0.75

图 10~图 12 为上述算例中 NACA64618 翼型表面结冰冰形模拟结果。由图 10~图 12 可知,风速、水滴直径和液态水含量的增大均可使得 NACA64618 翼型表面结冰强度增强,结冰区域扩大、结冰厚度与结冰量增加。风速和水滴直径的增大使水滴动量增加,使得水滴更易撞击到翼型前缘,导致水滴收集系数增大;增加液态水含量则直接导致水滴收集系数增大。这就使得结冰的物质基础增强,NACA64618 翼型表面结冰强度随之增强。

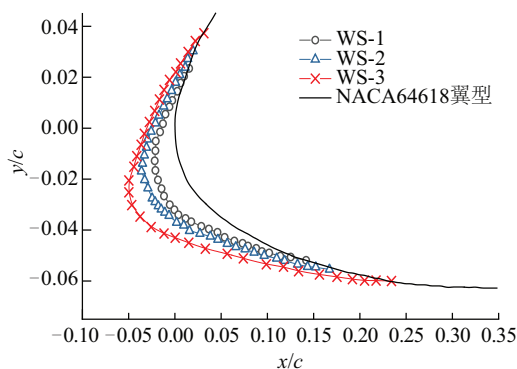


图 10 不同风速对结冰形状的影响

Fig. 10 Influence of ice shapes by wind speeds

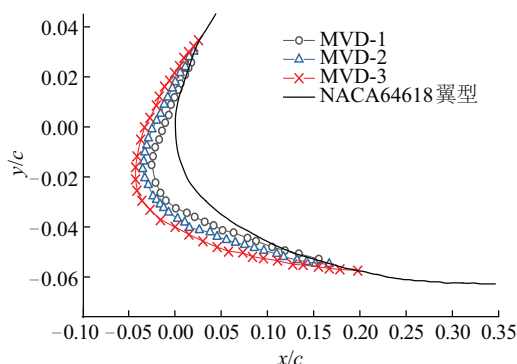


图 11 不同水滴直径对结冰形状的影响

Fig. 11 Influence of ice shapes by medium volume diameter

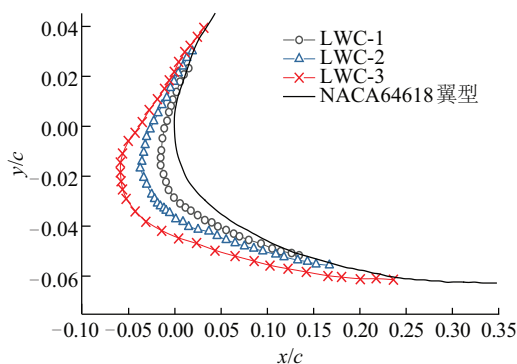


图 12 不同液态水含量对结冰形状的影响

Fig. 12 Influence of ice shapes by liquid water content

4 结论

本文首先建立了水滴收集系数的欧拉法计算方法,在此

基础上建立了风力机叶片翼型结冰模型,并以 NACA0012 翼型结霜冰算例验证了该模型的有效性,而后开展了 NREL 5 MW 风力机叶片外部翼型(NACA64618)结冰模拟,最后分析了风速、液态水含量和水滴直径等因素对 NACA64618 翼型结冰的影响。得到的主要结论如下:

1) NACA0012 的水滴收集系数与翼型结冰验证算例计算结果与实验值及文献值的对比,证明本文建立的水滴收集系数计算方法与翼型结冰模拟方法具有足够的有效性与准确性。

2) 攻角由 0° 增大至 12° 时, NACA64618 翼型表面结霜冰区域移向压力面; 结冰厚度增加, 最大结冰厚度约增加 167%。

3) 增大风速、液态水含量和水滴直径均加剧 NACA64618 翼型表面结冰, 结冰区域扩大、结冰量与结冰厚度增加。

[参考文献]

- [1] BATTISTI L. Wind turbines in cold climates: icing impacts and mitigation systems[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [2] PRYOR S C, BARTHELMIE R J. Climate change impacts on wind energy: a review[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(1): 430-437.
- [3] TAMMELIN B, SEIFERT H. Large wind turbines go into cold climate regions[C]//EWEC. Copenhagen, Denmark, 2001.
- [4] CATTIN R. Icing of wind turbines[C]//Onshore O&M Forum, Hamburg, Germany, 2013.
- [5] DROUBI M G, ISLAM S Z. Investigation of the effect of ice accretion on wind turbine aerodynamics and performance[C]// UK-China Workshop on Wind Power in Cold Climate. Mianyang, China, 2016.
- [6] DAVIS N N, PINSON P, HAHMANN A N, et al. Identifying and characterizing the impact of turbine icing on wind farm power generation[J]. Wind energy, 2016, 19(8): 1503-1518.
- [7] BURTCHE D G. Using reanalysis data for the prediction of seasonal wind turbine power losses due to icing[D]. North Dakota: University of North Dakota, 2014.
- [8] WALLENIUS T, LEHTOMÄKI V. Overview of cold climate wind energy: challenges, solutions, and future needs[J]. WIREs energy and environment, 2016, 5(2): 128-135.
- [9] SUNDEN B, WU Z. On icing and icing mitigation of wind turbine blades in cold climate[J]. Journal of energy resources technology, 2015, 137(5): 051203.
- [10] MALMSTEN J K. Wind turbine production losses in cold climate[D]. Gotland: Gotland University, 2011.
- [11] ILINCA A. Analysis and mitigation of icing effects on wind turbines[J]. Wind turbines, 2011, 4(4): 183-214.
- [12] BARBER S, WANG Y, JAFARI S, et al. The impact of

- ice formation on wind turbine performance and aerodynamics [J]. *Journal of solar energy engineering*, 2011, 133(1): 1.
- [13] 李岩, 田川公太郎. 叶片附着物对直线翼垂直轴风力机性能的影响[J]. *动力工程*, 2009, 29(3): 292-296.
LI Y, KOTARO T. Influence of blade attachment on performance of the straight-bladed vertical axis wind turbine [J]. *Journal of power engineering*, 2009, 29(3): 292-296.
- [14] HAN Y Q, PALACIOS J, SCHMITZ S. Scaled ice accretion experiments on a rotating wind turbine blade [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2012, 109: 55-67.
- [15] 易贤, 王开春, 马洪林, 等. 水平轴风力机结冰及其影响计算分析[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(6): 1052-1058.
YI X, WANG K C, MA H L, et al. Computation of icing and its effect of horizontal axis wind turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2014, 35(6): 1052-1058.
- [16] PEDERSEN M C, SØRENSEN H. Towards a CFD model for prediction of wind turbine power losses due to icing in cold climate [C]// *International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. Honolulu, HI, USA, 2016.
- [17] PEDERSEN M C, SØRENSEN H, SWYTINK-BINNEMA N, et al. Measurements from a cold climate site in Canada: boundary conditions and verification methods for CFD icing models for wind turbines [J]. *Cold regions science and technology*, 2018, 147: 11-21.
- [18] 邓晓湖, 卢绪祥, 李录平, 等. 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.
DENG X H, LU X X, LI L P, et al. Numerical simulation of airfoil ice accretion process on horizontal-axis wind turbine blade [J]. *Energy technology*, 2010, 31(5): 266-271.
- [19] HOMOLA M C, WALLENUS T, MAKKONEN L, et al. Turbine size and temperature dependence of icing on wind turbine blades [J]. *Wind engineering*, 2010, 34(6): 615-627.
- [20] 任鹏飞, 徐宇, 宋娟娟, 等. 霜冰条件对翼型气动性能影响数值研究[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(4): 663-668.
REN P F, XU Y, SONG J J, et al. Numerical study about the influence of rime ice conditions on airfoil [J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2014, 35(4): 663-668.
- [21] 赵秋月. 航空发动机进口支板及整流帽罩水滴撞击特性的计算分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
ZHAO Q Y. Computational analysis of water droplet impingement property for the inlet struct and the cone [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [22] 杨胜华, 林贵平, 申晓斌. 三维复杂表面水滴撞击特性计算[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(2): 284-290.
YANG S H, LIN G P, SHEN X B. Water droplet impingement prediction for three-dimensional complex surfaces [J]. *Journal of aerospace power*, 2010, 25(2): 284-290.
- [23] 易贤, 王开春, 桂业伟, 等. 结冰面水滴收集率欧拉计算方法研究及应用[J]. *空气动力学学报*, 2010, 28(5): 596-601, 608.
YI X, WANG K C, GUI Y W, et al. Study on Eulerian method for icing collection efficiency computation and its application [J]. *Acta aerodynamica sinica*, 2010, 28(5): 596-601, 608.
- [24] KIM J, DENNIS P G, SANKAR L, et al. Ice accretion modeling using an eulerian approach for droplet impingement [C]// *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Grapevine, TX, USA, 2013: 246.
- [25] WIROGO S, SRIRAMBHATLA S. An eulerian method to calculate the collection efficiency on two and three dimensional bodies [C]// *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, NV, USA, 2003: 1073.
- [26] 胡良权, 陈进格, 沈昕, 等. 风力机叶片结冰水滴收集系数计算[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(3): 22-28.
HU L Q, CHEN J G, SHEN X, et al. Calculation of water droplets collection efficiency on wind turbine blades [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2020, 41(3): 22-28.
- [27] TONG X L, LUKE E. Eulerian simulations of icing collection efficiency using a singularity diffusion model [C]// *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA, 2005: 1246.
- [28] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT UDF Manual. ANSYS FLUENT 14.0[M] California: ANSYS Inc, 2011.
- [29] SHIN J, BOND T. Results of an icing test on a NACA 0012 airfoil in the NASA Lewis Icing Research Tunnel [C]// *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, NV, USA, 1992: 647.
- [30] HASANZADEH K, LAURENDEAU E, PARASCHIVOIU I. Quasi-steady convergence of multistep Navier-Stokes icing simulations [J]. *Journal of aircraft*, 2013, 50(4): 1261-1274.
- [31] 战培国. 国外寒冷地区风力机结冰问题研究[J]. *航空科学技术*, 2016, 27(2): 1-6.
ZHAN P G. Review of the wind turbine icing in overseas cold regions [J]. *Aeronautical science & technology*, 2016, 27(2): 1-6.
- [32] BURTON T, SHARPE D, JENKINS N, et al. Wind

- energy handbook [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [33] 刘磊. 风力机叶片非定常气动特性的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2012.
- LIU L. Research on the unsteady aerodynamic characteristics of wind turbine blades [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [34] VILLALPANDO F, REGGIO M, ILINCA A. Prediction of ice accretion and anti-icing heating power on wind turbine blades using standard commercial software [J]. Energy, 2016, 114: 1041-1052.
- [35] REID T, BARUZZI G, OZCER I, et al. FENSAP-ICE simulation of icing on wind turbine blades, part 1: performance degradation [C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Grapevine, TX, USA, 2013: 750.
- [36] REID T, BARUZZI G, OZCER I, et al. FENSAP-ICE simulation of icing on wind turbine blades, part 2: ice protection system design [C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Grapevine, TX, USA, 2013: 751.
- [37] 胡良权. 水平轴风力机叶片结冰问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- HU L Q. Study of horizontal axis wind turbine blade icing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

ICING SIMULATION OF AIRFOIL OF NREL 5 MW WIND TURBINE BLADE

Du Jingyu¹, Hu Liangquan², Ren Xin¹, Shen Xin²

(1. Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this paper, the Euler method water droplet collection coefficient model and the airfoil icing model are established, and the NACA0012 airfoil icing calculation example is used to verify the effectiveness of the model. The numerical simulation of NREL 5 MW wind turbine blade outer airfoil icing (NACA64618) is carried out. The effects of wind speed, liquid water content and droplet diameter on the icing of the airfoil are studied. The numerical simulation results show that with the increase of the angle of attack, the icing area of NACA64618 airfoil moves towards the pressure surface, and the icing thickness increases (the maximum increase is about 167%). The increase of wind speed, liquid water content and droplet diameter can all aggravate the icing of NACA64618 airfoil, and increase the icing area, icing amount and icing thickness.

Keywords: wind turbines; blades; airfoil; freezing; numerical simulation; water droplets impingement characteristics