

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.10.001

引用格式:范才进,牛唯,卓然,等.基于剖面分割的大型风力发电机叶片三维覆冰增长特性分析[J].重庆大学学报, 2025,48(10): 1-10.



基于剖面分割的大型风力发电机叶片三维覆冰增长特性分析

范才进¹,牛唯²,卓然¹,陈沛龙²,刘磊¹,毛先胤²,黄欢²,杨旗²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663; 2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院 南方电网有限责任公司防冰减灾重点实验室, 贵阳 550002)

摘要:覆冰是影响风力发电机安全稳定运行的重要因素,建立风力发电机叶片覆冰数值计算模型是实现其覆冰模拟和预测的重要手段。有限元法是当前最常用的方法,但该方法计算量大,效率较低。以 300 kW 风力发电机叶片为研究对象,基于剖面分割法对叶片表面水滴碰撞、冻结和覆冰形态变化展开研究,建立了风机叶片多截面气液二相流仿真计算模型,推导了叶片表面水滴局部、整体碰撞系数和冻结系数公式,实现了在较小计算量下对风机叶片表面整体水滴碰撞特性的获取。研究结果表明:风机叶片水滴碰撞系数由叶尖向叶根方向逐渐减小, β_1 最大值和 α_1 到叶中(0.5R处)均可降低80%以上。风机叶片覆冰水滴捕获量最大位置位于靠近叶尖的0.8R~0.9R处,而一般覆冰均主要分别在0.5R~R范围内,水膜溢流作用使风机叶片截面的水滴冻结系数呈现水滴碰撞区域小而溢流区域大的特点,而越靠近风机叶片叶尖的位置覆冰增长过程冰形迭代变化程度越大,覆冰速率线性度也越差。

关键词:风力发电机;覆冰;水滴碰撞;边界元

中图分类号:TM85

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)10-001-10

Analysis of three-dimensional icing characteristics of large wind turbine blades based on profile segmentation

FAN Caijin¹, NIU Wei², ZHUO Ran¹, CHEN Peilong², LIU Lei¹, MAO Xianyin²,
HUANG Huan², YANG Qi²

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, P. R. China;

2. Key Laboratory of Ice Prevention & Disaster Reducing of China Southern Power Grid Co., Ltd., Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, P. R. China)

Abstract: Ice accretion is a crucial factor affecting the safe and stable operation of wind turbines. Developing a numerical model for simulating ice formation on wind turbine blades is essential for predicting icing phenomena. Although the finite element method is currently the most widely used approach, it is computationally intensive and inefficient for large-scale applications. This study focuses on the blades of a 300 kW wind turbine, employing a

收稿日期:2024-09-29

基金项目:南方电网有限责任公司防冰减灾重点实验室贵州电网公司2022年第一批网级决策科技项目(GZKJXM20220056)。

Supported by China Southern Power Grid Co., Ltd. Technology Project (GZKJXM20220056).

作者简介:范才进(1989—),男,博士,主要从事复杂大气环境下输电线路外绝缘及防护研究,(E-mail)Fan_caijin@126.com。

profile segmentation method to investigate water droplet impact, freezing, and ice accretion morphology changes on blade surfaces. A multiphase flow simulation model for air and liquid on the blade surface is developed, and formulas for local and overall collision and freezing coefficients are derived. This approach enables characterization of overall water droplet impact and freezing behavior with reduced computational load. Results reveal that the water droplet collision coefficient decreases gradually from the blade tip toward the root, with reductions exceeding 80% in the maximum values of β_i and α_i at approximately $0.5R$. Maximum water droplet capture occurs near the blade tip ($0.8R$ to $0.9R$), while significant ice accretion predominantly occurs between $0.5R$ and R . The overflow effect of the water film results in low freezing coefficients in the droplet collision zone but higher values in the overflow region. Furthermore, closer to the blade tip, ice growth exhibits greater iterative shape changes, and reduced linearity in the ice accretion rate.

Keywords: wind turbine blade; icing; water droplet collision; icing accretion morphology

近年来,风力发电已成为全球可再生能源的重要组成部分之一。截至2022年底,全球风力发电装机容量已经达到1 000 GW左右,从发展趋势来看,风力发电技术正在不断改进和创新,例如增加风机高度、提高风机效率、降低成本以及增强可靠安全性等^[1-3]。根据中国风能行业协会的数据,覆冰是风力发电面临的主要问题之一,每年因此造成很大损失。在2018年的一次覆冰天气中,中国多个省份的风力发电机组停机率高达70%以上,导致全国风电发电量减少了约2.5亿kW·h,损失达1.7亿元人民币^[4-5]。

为研究风力发电机叶片覆冰的防治方法,国内外学者对风机叶片覆冰形成机制及影响特性展开了大量研究。风力发电机叶片覆冰主要集中在前缘部分,主要由空气中过冷却水滴碰撞冻结而成^[6]。黎芷毓等^[7]在数值模拟300 kW大型风力发电机叶片雾凇覆冰时,采用拉格朗日法计算了风机叶片表面的水滴碰撞系数。Shu等^[8]则基于FLUENT软件采用欧拉法实现了对风机叶片表面水滴碰撞系数的求解,并通过人工覆冰试验验证了仿真计算结果,结果表明:在不同风速、温度和水滴中值直径条件下风机叶片表面覆冰范围、形态差异明显。

此外,FENSAP软件也常用于风机叶片表面覆冰增长的数值模拟,并可得出水滴碰撞系数分布。Jin等^[9]基于FENSAP对风机叶片翼型S826和S832进行了覆冰模拟,并通过风洞试验进行验证,发现在相同覆冰环境下,与S826相比,S832型风机叶片的冰形更为复杂,2种翼型气动性能差异与覆冰厚度和类型相关。Ibrahim等^[10]研究了旋转风力发电机叶片上结冰的比例和相似性,使用FENSAP ICE软件进行数值CFD(computational fluid dynamics)结冰模拟,并测试了风机叶片翼型缩放方法对覆冰结果的影响。

为提高风机覆冰数值模拟的效率,解决覆冰计算中的一些特殊问题,许多研究者还编写了结冰计算软件。Wang等^[11]针对风机叶片提出了一种改进的多重结冰数值计算模型,该模型整合了流场计算、水滴碰撞冻结过程,可用于解决风机叶片外边流场的周期性变化对覆冰过程造成的影响。Son等^[12]则编写了名为WISE的风机叶片三维结冰计算程序,并通过FENSAP验证了程序计算结果。

为进一步揭示覆冰对风机功率输出特性的影响,舒立春等^[13-15]在人工气候室和自然环境条件下研究了覆冰环境参数对小型风力发电机功率输出特性的影响;胡琴等^[16]利用了轻黏土和腻子试验模拟不同形态覆冰对其功率的影响特性,结果显示:相对于流线冰,角状冰会带来更多的气动载荷损失。李瀚涛等^[17]则考虑了覆冰粗糙度对风机气动性能的影响,发现覆冰叶片气动性能下降主要由叶片气动外形变化导致,而受覆冰粗糙度的影响较小。

风力发电机工况特殊,当前对叶片覆冰的防治手段仍不完善,而基于环境条件对风机叶片覆冰增长速率进行仿真模拟是一项重要手段。应用较多的是利用CFD流体力学仿真计算软件模拟风机覆冰涉及到的流场、水滴碰撞和冻结,但该过程较为复杂,且风力发电机尺寸大、网格数量多,对计算机性能和计算时间有一定要求,一定程度上制约了该技术在风机覆冰预测、预警和防治上的应用。

笔者以300 kW风机叶片为研究对象,采用剖面分割法来研究风机叶片不同位置水滴碰撞和冻结特性,

并将计算结果和其他研究者的试验观测结果进行对比,在规避大量有限元网格绘制和迭代计算量的同时获得风机叶片表面较为准确的水滴碰撞、冻结、覆冰形态变化规律,为风力发电机叶片覆冰预测、预警和防治提供数据和方法参考。

1 风力发电机叶片覆冰数值计算模型

如图 1 所示,风力发电机叶片覆冰主要是由空气中随气流运动的过冷却水滴碰撞冻结形成的,而风机叶片外部空气中的过冷却水滴随气流运动形成气-液二相流,水滴运动特性主要取决于气流对水滴的作用力。

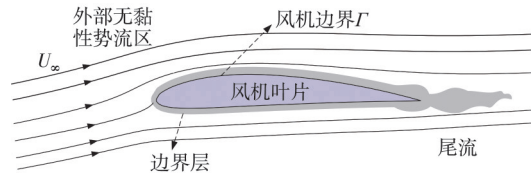


图 1 风机叶片翼型外部流场划分

Fig.1 Division of external flow field of wind turbine blade surface icing

为获得水滴在叶片表面的碰撞特性,采用欧拉法求解风力发电机叶片外部气-液二相流分布(利用 FLUENT 软件),该分布中气流运动满足质量、动量和能量守恒的非线性微分方程为

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla(\rho_a \mathbf{v}_a) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_a \mathbf{v}_a}{\partial t} + \nabla(\rho_a \mathbf{v}_a \cdot \mathbf{v}_a) = \nabla \sigma^i + \rho_a \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_a E_a}{\partial t} + \nabla(\rho_a \mathbf{v}_a H_a) = \nabla(k_a(\nabla T) + \mathbf{v}_l \tau^i) + \rho_a \mathbf{g} \mathbf{v}_a, \quad (3)$$

式中: ρ_a 是气流密度, kg/m^3 ; \mathbf{v}_a 是气流速度, m/s ; T 表示空气静态温度, K ; σ^i 是应力张量, Pa ; E_a 和 H_a 是总能量和焓; t 为时间, s ; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s^2 ; k_a 热传导系数, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$; \mathbf{v}_l 为二相流速度, m/s ; τ^i 为黏性应力张量, N/m^2 ; 水滴和气流一样被视为连续相,其运动的质量平衡和动量方程为

$$\frac{\partial(\rho_w \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \alpha \mathbf{v}_w) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_w \alpha \mathbf{v}_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \alpha \mathbf{v}_w \cdot \mathbf{v}_w) = \rho_w \alpha \frac{C_D Re_d}{24k} (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_w), \quad (5)$$

式中: \mathbf{v}_w 是水滴的速度, m/s ; α 是空气中水滴的体积分; ρ_w 是气流密度, kg/m^3 ; C_D 是液滴阻力系数; Re_d 是水滴相对气流运动的雷诺数; k 是运动质点惯性的 Stokes 数。

$$Re_d = \frac{2R_d \rho_a |\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_w|}{\mu}, \quad (6)$$

式中: μ 为空气的运动黏度, m^2/s ; R_d 为水滴半径, m 。

通过气-液二相流求解后可获得水滴在风机叶片表面的体积分 α ,进而可通过式(7)获得叶片表面的水滴局部碰撞系数 β_1 和整体碰撞率 α_1 分别为

$$\beta_1 = \frac{\alpha}{\alpha_\infty} \cdot \frac{|\mathbf{v}_w \cdot \mathbf{n}|}{V_\infty}, \quad (7)$$

$$\alpha_1 = \frac{\int_L \beta_1 dL}{H}, \quad (8)$$

式中: L 是二维叶片轮廓长度, m ; H 代表叶片垂直于气流方向的最大厚度,即叶片在气流方向上投影的最大高度, m ; \mathbf{n} 为叶片表面水滴碰撞单位的法向向量; α_∞ 和 V_∞ 分别为无穷远处空气中水滴体积分和风速; dL 为沿着叶片二维轮廓的长度微元;水滴碰撞风机叶片后,可通过热平衡和质量平衡方程求解其冻结比例。如图 2 所示,覆冰在风机叶片表面的冻结过程主要获得热量为水滴碰撞动能和冻结过程释放潜热,损失的热量包括热辐射、蒸发或升华消耗热量,对流热量和加热过冷却水滴至冻结温度所需热量等,热平衡方程为

$$Q_c + Q_e + Q_w + Q_r = Q_m + Q_{f0} \quad (9)$$

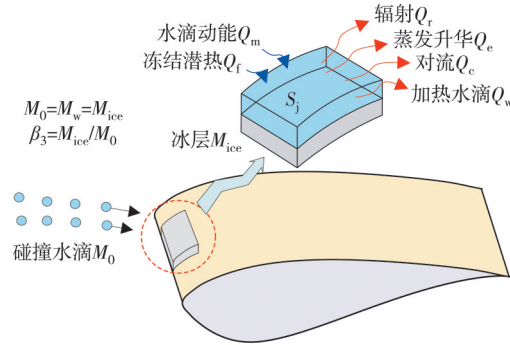


图 2 风机叶片表面覆冰热平衡示意图

Fig.2 Schematic diagram of thermal balance of wind turbine blade surface icing

结合冻结质量平衡,碰撞水滴质量 M_0 为冻结冰层质量 M_{ice} 和未冻结水量 M_w 之和,可求解水滴局部冻结系数 β_3 为^[18]

$$\beta_3 = S_j \cdot \frac{h_c(T_w - T) + \chi[e(T_w) - e(T)] + \beta_1 V_w C_w(T_w - T)}{M_0 L_f} + \frac{4\varepsilon\sigma_R T^3 \cdot (T_w - T) - 0.5 \times S_j \cdot \beta_1 w V^3}{M_0 L_f}, \quad (10)$$

式中: S_j 为风机叶片上目标单元面积, m^2 ; h_c 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_w 为水滴冻结温度, K ; χ 为蒸发系数; $e(T)$ 为温度 T 时冻结表面的饱和水汽压, kPa ; w 为空气中液态水含量, kg/m^3 ; V 为叶片相对气流运动速度; C_w 为水的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ε 为发射率, $\varepsilon = 0.95$; σ_R 为斯蒂芬-玻耳兹曼常量; L_f 为冰的融化潜热, J/kg 。

2 风力发电机叶片水滴碰撞特性

以 300 kW 三叶片风力发电机叶片为研究对象,该风力发电机基本参数如表 1 所示。风力发电机旋转过程中叶片各位置和气-液二相流的相对速率很大,若将风机叶片剖切为多个截面(见图 3),剖切间距需要根据可接受的相邻截面最大水滴碰撞系数误差决定。根据风力发电机 $V-n$ 运行曲线(见图 4)可计算各截面所处位置合成速度,进而按式(7)(8)计算水滴在叶片表面的局部碰撞系数 β_1 和整体碰撞系数 α_1 。

表 1 300 kW 风力发电机基本参数

Table 1 Basic parameters of a 300 kW wind turbine

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	300	叶片长度/m	14.6
额定转速/($r \cdot min^{-1}$)	44	塔架高度/m	30
风轮直径/m	31	额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	13

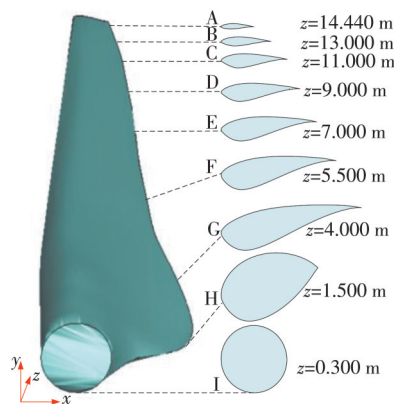


图 3 风机叶片剖切示意图

Fig.3 Slices of the wind turbine blade

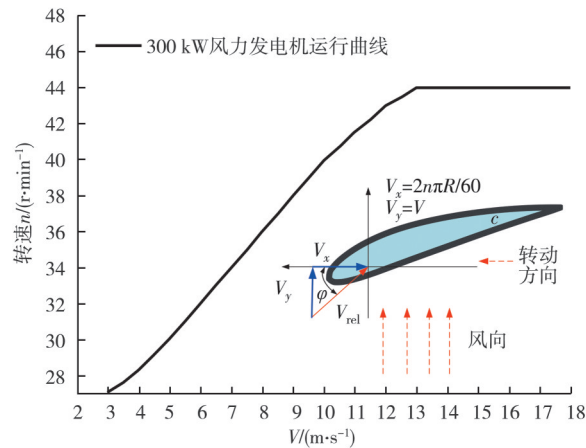
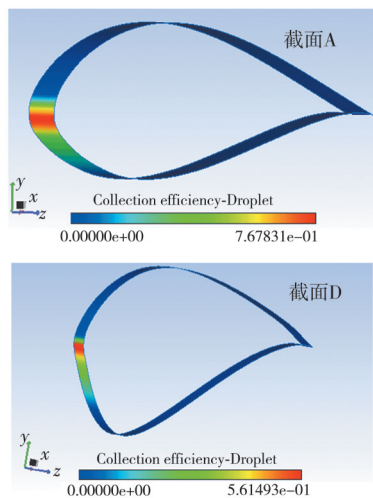


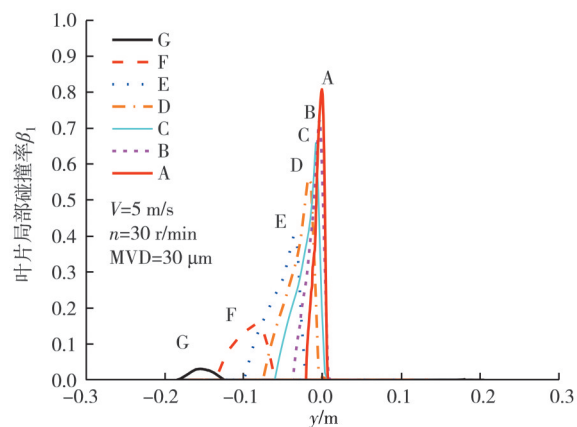
图 4 风力发电机运行曲线

Fig.4 Wind turbine operation curve

如图 5 所示,由于不同截面形态、大小及所处位置运行线速度不同,各个截面的水滴局部碰撞系数的分布差异明显。对于局部碰撞系数 β_1 值而言,各个截面最大水滴碰撞系数均位于截面的驻点处,沿着两边逐渐减小,截面位置越靠近叶尖,水滴碰撞系数 β_1 最大值越大,在旋转半径为 14.44 m 截面 A 处,驻点 β_1 最大为 0.8,而在旋转半径为 4 m 的截面 G 处 β_1 最大仅 0.03。对于碰撞范围而言,从截面 A 到截面 G,水滴碰撞范围先逐步增大,而后又逐渐缩小。由此可知:风机叶片靠近轮毂的位置由于截面尺寸较大、线速度较小则不易捕获过冷却水滴,而靠近叶尖位置往往更易捕获空气中的过冷却水滴而形成覆冰。若将对每个截面水滴局部碰撞系数进行积分处理,可得到各截面的水滴整体碰撞系数 α_1 ,如图 6 所示,图中 R 为叶片截面所处位置离叶根的长度。



(a) 截面 A 和 D 表面的水滴碰撞系数分布(3D)



(b) 各截面水滴碰撞系数分布(2D)

图 5 风机叶片各截面局部水滴碰撞系数 β_1 Fig.5 Local water droplet collision efficiencies β_1 of blade slides

α_1 沿着整个叶片的分布主表现出以下特征:1) α_1 值均在叶尖处最大,沿着叶片向轮毂方向逐渐降低,但 α_1 值的零点并不在轮毂位置;2) α_1 值的零点位置主要受到水滴粒径大小的影响,当水滴中值体积直径(median volume diameter, MVD)较大时,该位置靠近轮毂,否则靠近叶尖。根据 α_1 的变化规律,风机叶片的覆冰区域主要集中在 $0.5R \sim R$ 范围内。例如在 MVD 为 20 μm 时,在 2 种工况下($V=5 \text{ m/s}$ 和 8 m/s)风机叶片的 7~14.44 m 位置才会有覆冰产生,其余位置无覆冰。

β_1 和 α_1 反映了叶片局部或整个截面在迎风侧投影范围内水滴碰撞捕获的比例,为进一步对比叶片各位置水滴捕获量的差异,假设空气中液态水含量 $w=1 \text{ g/m}^3$,对单位时间 1 s 内叶展方向 1 m 厚各个截面叶片表

面水滴质量捕获速率 M 进行计算, 得到结果如图7所示。

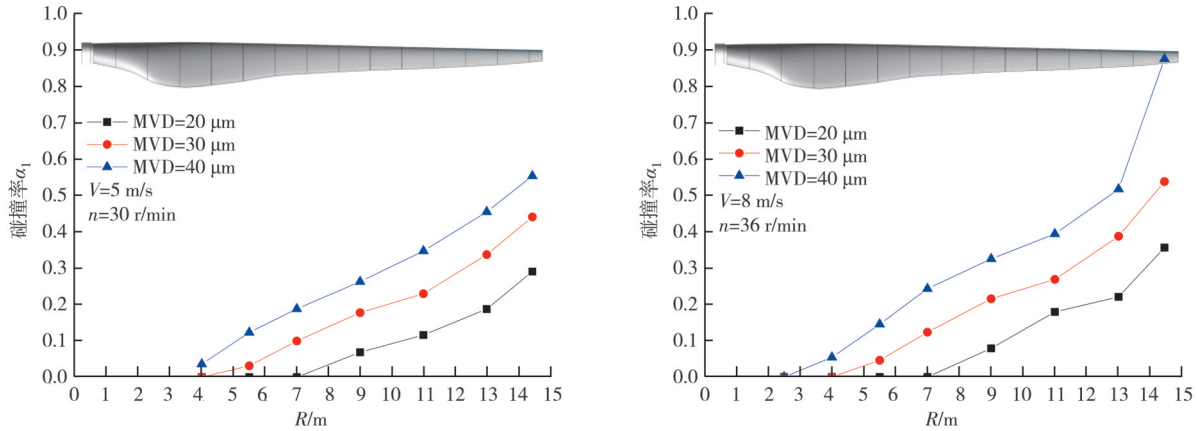


图6 风机叶片各截面整体水滴碰撞系数 α_1

Fig.6 Overall water droplet collision efficiencies α_1 of blade slides

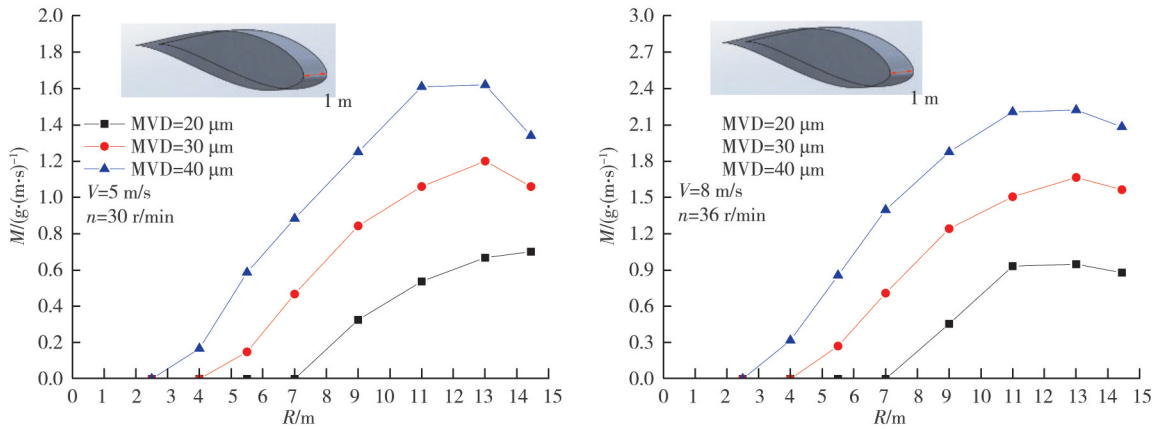


图7 风机叶片各截面(1 m厚)整体水滴质量捕获速率 M

Fig.7 The overall water droplet mass capture rate M of blade slides at a thickness of 1 m

不同于水滴碰撞系数, 水滴质量捕获速率 M 反映了叶片整体对过冷却水滴的捕获速率。根据2种运行条件下的计算结果, M 值沿着叶展方向从轮毂向叶尖呈现先增加后减小的规律, 这表明: 尽管叶尖处的水滴碰撞系数最大, 但相同时间内叶尖不再是获得过冷却水滴最多的位置, 而靠近叶尖的 $R=12\sim 13$ m 处捕获的水滴量更多。该结论可为风机叶片电热防冰线路的优化布置提供参考。

3 风力发电机叶片覆冰模拟及增长规律

3.1 风机叶片表面的水滴冻结特性

风机叶片表面水滴的碰撞系数(局部 β_1 或整体 α_1)可用于计算覆冰水的获得量, 通过式(9)~(10)的求解可得到该覆冰水量的冻结比例, 即冻结系数 α_3 或 β_3 , 由此可通过 Makkonen 模型^[19]获得覆冰形态和速率 dM/dt 。

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt}(\text{Local}) = V_{\text{rel}} w \beta_1 \beta_3 ds, \\ \frac{dM}{dt}(\text{Overall}) = V_{\text{rel}} w \alpha_1 \alpha_3 ds. \end{cases} \quad (11)$$

式中, ds 为风机叶片表面覆冰计算针对目标单元的面积。

风机叶片表面冻结系数 β_3 分布如图8~9所示, 图中横坐标 S 表示沿着翼型截面的距离。对比水滴碰撞区域可知, 水滴实际冻结区域(即生成覆冰区域)要大于水滴碰撞区域, 这主要是由于水滴捕获后产生水膜, 水膜在风力作用下向叶片两侧溢流造成的, 越靠近外溢流边界的区域, 其水滴冻结系数 β_3 越接近于1, 表明水膜在溢流过程中被逐渐冻结, 最终被完全冻结为冰层。而在水滴碰撞区域内, β_3 最大值和 β_1 最大值位置并不重

合,也侧面证明了当空气中液态水含量较大时,叶片翼型驻点附件捕获的水滴大部分并未直接冻结,而是以水膜形式流向两侧。

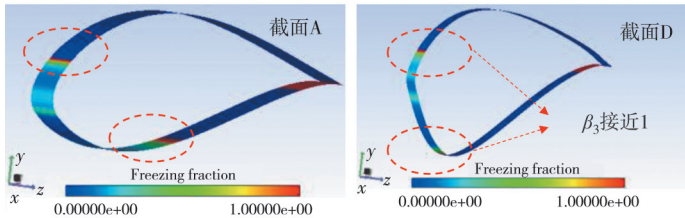


图 8 风机叶片截面 A 和截面 D 处水滴冻结系数分布

Fig.8 Distribution of water droplet freezing coefficient (section A and section D)

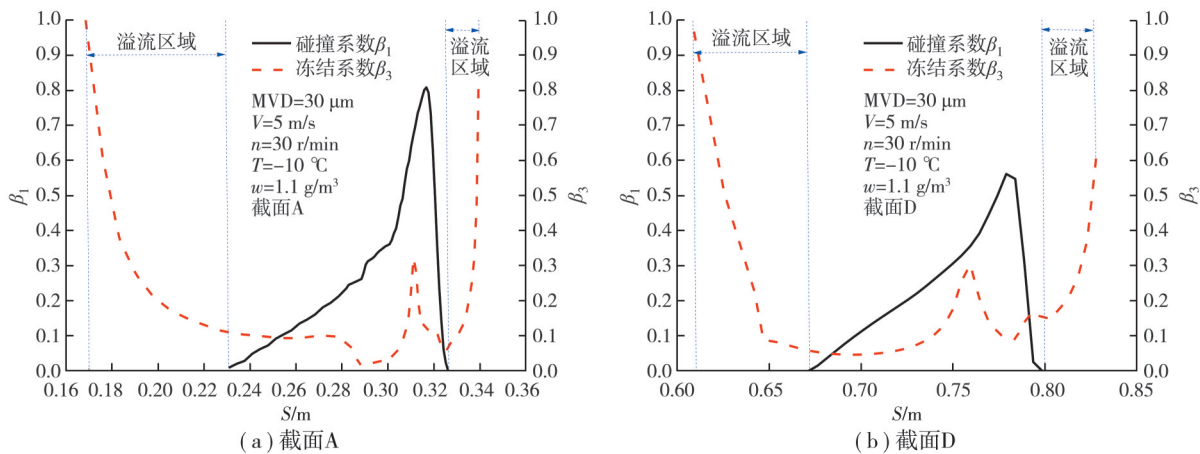


图 9 风机叶片截面 A 和截面 D 处 β_1 和 β_3 的对比结果

Fig.9 Comparison results of β_1 and β_3 (section A and section D)

此外,冻结系数 β_3 值受到风速 V 、温度 T 和液态水含量 w 的影响,当 T 降低, w 减小,水滴碰撞区域内的 β_3 值会迅速增大,溢流区域会相应减小,当风速增大时, β_3 值的变化则取决于对流换热效率的增大程度。

3.2 风机叶片覆冰形态和质量变化

由于风机叶片各个截面上水滴碰撞系数和冻结系数分布不均,相同时间内形成的覆冰形态和质量也差别巨大。设定迭代步长为 $dt=15\text{ min}$,90 min后各截面覆冰形态如图10所示,叶片整体三维形态与文献^[20-21]试

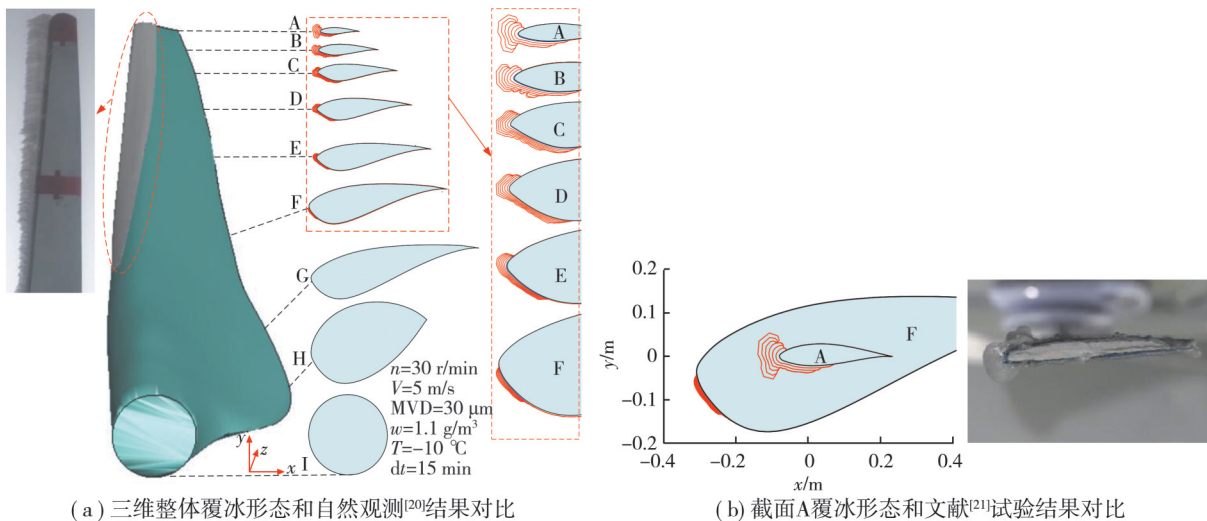


图 10 风机叶片各截面覆冰形态

Fig.10 Comparison of icing shapes on blade slides

验观测结果一致。对于叶尖处截面A,覆冰开始时,冰层分布较宽,包含前缘和截面下表面,随着厚度的增加,覆冰逐渐集中于A截面前缘,覆冰整体形态粗糙且不均匀,极大改变了叶片截面翼型结构。随着截面向叶根方向移动,覆冰增长速率降低,水滴碰撞冻结位置的冰层分布逐渐均匀化,截面G~I位置基本无覆冰。

在设定条件下各个截面覆冰质量随覆冰时间增长情况如图11所示。各个截面覆冰质量 M_a 基本随时间线性增长,越靠近叶根的截面其 M_a-t 曲线线性度越好,反之越差。例如对截面A, $t < 45$ min时其覆冰速率基本保存不变, $t = 45$ min覆冰速率突然减小,而后又增大,这主要是由于叶尖位置覆冰形态变化较大造成水滴碰撞捕获量改变形成的。而对于截面E~F等,其本身截面尺寸较大,水滴碰撞冻结区域相对较小,冰层对其流场影响不大,因此覆冰速率小且稳定。

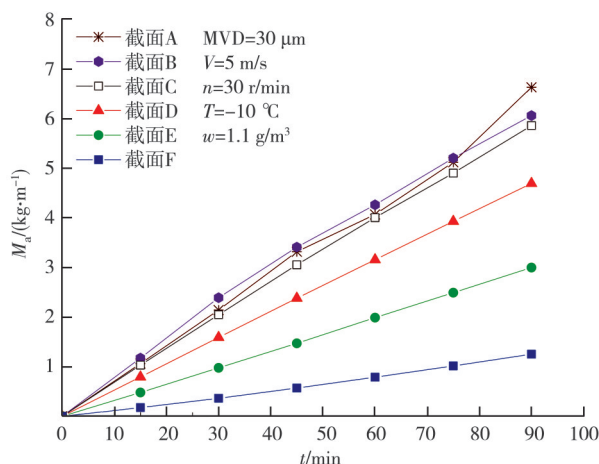


图11 风机叶片各截面覆冰质量(各截面均宽1 m)

Fig.11 Comparison of icing mass on blade slides (wide of 1 m)

4 结 论

1) 针对风力发电机叶片覆冰过程水滴碰撞、冻结物理过程,基于气液二相运动和热平衡方程建立了水滴碰撞和冻结数值计算模型。推导了风机叶片截面水滴整体碰撞系数计算式。

2) 对于类似300 kW大型风力发电机叶片可采用剖切法对叶片不同段二维截面水滴碰撞特性进行研究,可大幅降低计算量。一般运行条件下风机叶片水滴碰撞系数由叶尖向叶根方向逐渐减小, β_1 最大值和 α_1 到叶中(0.5R处)均可降低80%以上。

3) 风机叶片覆冰水滴捕获量最大位置位于靠近叶尖的0.8R~0.9R处,而一般覆冰均主要分别在0.5R~R范围内,叶片防冰需重点关注该位置内的覆冰增长情况,对于其他位置可不用采取防冰措施。

4) 由于水膜溢流作用,风机叶片截面的水滴冻结系数呈现水滴碰撞区域小而溢流区域大的特点(接近于1),从而进一步扩大了覆冰初期叶片表面的覆冰增长范围。

5) 越靠近风机叶片叶尖,覆冰增长过程冰形迭代变化程度越大,覆冰速率线性度也越差,反之,对越靠近叶根方向的截面,冰层对截面形态的影响较小,覆冰速率也更为稳定。

参考文献

[1] 王月普. 风力发电现状与发展趋势分析[J]. 电力设备管理, 2020(11): 21-22.

Wang Y P. Analysis of current situation and development trend of wind power generation[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(11): 21-22. (in Chinese)

[2] 王孟夏, 周生远, 杨明, 等. 计及海底电缆热特性的可接纳海上风电装机容量评估方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 195-202.

- Wang M X, Zhou S Y, Yang M, et al. Assessment method for acceptable installed capacity of offshore wind farms considering thermal characteristics of submarine cables[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 195-202. (in Chinese)
- [3] 胡琴, 杨秀余, 梅冰笑, 等. 风力发电机叶片临界防冰与融冰功率密度分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4997-5002.
- Hu Q, Yang X Y, Mei B X, et al. Analysis of threshold power density for anti-icing and de-icing of wind turbine blade[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4997-5002. (in Chinese)
- [4] Zhang Y W, Guo W F, Li Y, et al. An experimental study of icing distribution on a symmetrical airfoil for wind turbine blade in the offshore environmental condition[J]. Ocean Engineering, 2023, 273: 113960.
- [5] 胡琴, 王欢, 邱刚, 等. 风力发电机叶片覆冰量化分析及其应用[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5607-5616.
- Hu Q, Wang H, Qiu G, et al. Quantitative analysis of wind turbine blade icing and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5607-5616. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 黎芷毓, 蒋兴良, 韩兴波, 等. 风力发电机叶片的雾凇覆冰数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 155-162.
- Li Z Y, Jiang X L, Han X B, et al. Numerical simulation on rime icing of wind turbine blades[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(3): 155-162. (in Chinese)
- [8] Shu L C, Liang J, Hu Q, et al. Study on small wind turbine icing and its performance[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 134: 11-19.
- [9] Jin J Y, Virk M S. Experimental study of ice accretion on S826 & S832 wind turbine blade profiles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 169: 102913.
- [10] Ibrahim G M, Pope K, Naterer G F. Scaling formulation of multiphase flow and droplet trajectories with rime ice accretion on a rotating wind turbine blade[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 232: 105247.
- [11] Wang Q, Yi X, Liu Y, et al. Simulation and analysis of wind turbine ice accretion under yaw condition *via* an Improved Multi-Shot Icing Computational Model[J]. Renewable Energy, 2020, 162: 1854-1873.
- [12] Son C, Kim T. Development of an icing simulation code for rotating wind turbines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 203: 104239.
- [13] 舒立春, 任晓凯, 胡琴, 等. 环境参数对小型风力发电机叶片覆冰特性及输出功率的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5873-5878.
- Shu L C, Ren X K, Hu Q, et al. Influences of environmental parameters on icing characteristics and output power of small wind turbine[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5873-5878. (in Chinese)
- [14] 舒立春, 李瀚涛, 胡琴, 等. 自然环境叶片覆冰程度对风力机功率损失的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5599-5605.
- Shu L C, Li H T, Hu Q, et al. Effects of ice degree of blades on power losses of wind turbines at natural environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5599-5605. (in Chinese)
- [15] 舒立春, 于周, 李瀚涛, 等. 洁净与覆冰条件下风力发电机输出功率计算方法及现场试验验证[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 3041-3051.
- Shu L C, Yu Z, Li H T, et al. Calculation method of wind turbine output power under clean and icing conditions verified by field tests[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 3041-3051. (in Chinese)
- [16] 胡琴, 杨大川, 蒋兴良, 等. 叶片模拟冰对风力发电机功率特性影响的试验研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4807-4815.
- Hu Q, Yang D C, Jiang X L, et al. Experimental study on the effect of blade simulated icing on power characteristics of wind turbine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(22): 4807-4815. (in Chinese)
- [17] 李瀚涛, 舒立春, 胡琴, 等. 考虑覆冰粗糙度影响的风力发电机叶片气动性能数值仿真[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2253-2260.

- Li H T, Shu L C, Hu Q, et al. Numerical simulation of wind turbine blades aerodynamic performance based on ice roughness effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2253-2260. (in Chinese)
- [18] 韩兴波, 蒋兴良, 毕聪来, 等. 基于分散型旋转圆导体的覆冰参数预测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1096-1105.
- Han X B, Jiang X L, Bi C L, et al. Prediction of icing environment parameters based on decentralized rotating conductors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1096-1105. (in Chinese)
- [19] Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires[J]. Journal of Applied Meteorology, 1984, 23(6): 929-939.
- [20] 黎芷毓. 风力发电机叶片雾凇覆冰数值模拟及自然覆冰验证研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- Li Z Y. Study of numerical simulation of rime icing of wind turbine blade and natural icing verification[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [21] 梁健, 舒立春, 胡琴, 等. 风力机叶片雨凇覆冰的三维数值模拟及试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4430-4436, 4584.
- Liang J, Shu L C, Hu Q, et al. 3-D numerical simulations and experiments on glaze ice accretion of wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4430-4436, 4584. (in Chinese)

(编辑 郑洁)