

贺莉微,陈正洪,李金建.风电场风机叶片覆冰气象条件及覆冰模型研究进展[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(3):1-7.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 风电场风机叶片覆冰气象条件及覆冰模型研究进展

贺莉微<sup>1,2</sup>,陈正洪<sup>2\*</sup>,李金建<sup>1</sup>

(1.成都信息工程大学大气科学学院大气科学系,四川 成都 610225;2.湖北省气象服务中心,湖北 武汉 430074)

**摘要:**随着我国风电行业的快速发展,覆冰已经成为严重威胁风电场安全稳定运行的因素之一,针对这一问题,国内外学者陆续开展了相关研究。综合现有研究成果,从覆冰概况、研究方法分类、影响覆冰的因素、风机叶片覆冰期特点等方面做了总结。大量的研究成果显示:影响风机叶片覆冰的气象因素主要为环境温度、相对湿度、风速、液态水含量(Liquid Water Content, LWC)和体积中径(Median Volume Diameter, MVD)等。此外,冰风洞试验和数值仿真模拟方面已有很多成果,而覆冰模型法的研究还较少,后续研究的重点是开展对高分辨率数值预报产品的订正研究,构建适用于本地的风机叶片覆冰模型,为风电场提前预警覆冰期以采取融冰措施、合理安排生产等提供科学参考。

**关键词:**覆冰;风电场;研究进展

**中图分类号:** TM75

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0799(2023)03-0001-07

据《2020年全球气候状况》分析报告显示,2020年是有气象记录以来3个最暖年份之一,6月北极圈内的一个西伯利亚小镇气温达到38℃,超过历史极值。2022年3月18日,南极洲多个考察站测得创纪录高温。其中康科迪亚南极考察站测得-11.5℃,较往年同期平均水平高出约40℃。此外,北极部分地区3月中旬气温较往年同期平均水平高出约30℃,有的地区气温甚至逼近或达到冰点。温室气体的排放是加剧全球变暖的重要原因,在愈发严峻的情况下,碳减排成了许多国家的共识。2020年9月22日,中国在联合国一般性辩论发言宣布积极应

对气候变化新目标:“碳达峰,碳中和”。风能作为一种可再生的清洁能源,不仅在能源供应、安全以及推动经济增长方面发挥着重要作用,也在大气污染防治和温室气体减排中承担着非常重要的作用<sup>[1]</sup>。

据全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)统计<sup>[2]</sup>:中国已经成为全球最大的风电市场之一,2020年新增陆上和海上风电装机容量均位列全球第一,累计陆上风电装机总量全球第一。目前,我国的风电场主要集中在风资源丰富的西北、华北、东北地区,为了降低风电输送成本,加强就地利用率,我国中东部和南方山区风电开发逐渐增多。随着国内日益增多的风电场建成投入使用,其安全运行问题越来越受到关注,尤其是冬季风机叶片覆冰现象突出,风机叶片覆冰会造成风机使用寿命降低、影响发电量甚至威胁到工作人员及周边居民的生命安全。因此,风机覆冰问题已成为风电场安全运行需考虑的主要因素之一。

国外关于风机覆冰气象条件的研究始于20世纪90年代,国内相关研究成果还较少,公开发

收稿日期:2022-01-27;修回日期:2022-05-24

基金项目:中国气象局公共气象服务中心创新基金项目立项及经费(M2021012);湖北省气象局科技基金重点项目(2021Z08);中国气象局山洪地质灾害防治气象保障工程2021年预报预测与风险管理系统建设项目

作者简介:贺莉微(1988—),女,工程师,主要从事应用气象研究。  
E-mail:616664366@qq.com

通信作者:陈正洪(1964—),男,研究员,主要从事应用气象与气候变化研究。E-mail:chenzh64@126.com

表的论文较少。现有的研究成果大多基于人工气候实验室和计算机仿真模拟方法,主要以覆冰后对风机气动性的影响为研究目的,气象参数只是作为控制实验室和计算机仿真模拟覆冰厚度、覆冰质量的影响参数之一。湖北省气象服务中心针对风机覆冰开展了相关研究,分别于 2014 年和 2021 年获武汉区域气候中心和中国气象局公共气象服务中心项目支持。项目围绕“影响覆冰的气象条件及覆冰期的预报技术”等关键科学问题,开展了覆冰发生和消融以及持续阶段的气象要素配置条件、风机覆冰起止时间预报模型和建立风机覆冰综合评估指数的研究。此外,引入 Parameter-Elevation Regressions on Independent Slopes Model (PRISM)插值方法,基于机器学习(AdaBoost)对覆冰开始(消融)进行判别,准确率为 88.3%(开始)、83.6%(消融)。

鉴于国内相关研究较少,本文对国内外研究成果进行收集整理,从覆冰基本概况、研究方法、覆冰影响因素等方面对文献进行归纳总结,旨在为指导风电场防灾减灾,提高风电功率预报准确率和风电出力等方面提供科学依据。

## 1 风机叶片覆冰概况

### 1.1 覆冰定义及类型

过冷却水滴降落到温度低于冰点的物体表面上而形成的冰层。根据国际标准 ISO 12494 (Atmospheric Icing of Structures),覆冰分类见图 1。在对国内外文献进行梳理时,目前针对风力机叶片覆冰问题主要是围绕雨凇、雾凇和混合凇(图 2)开展,其主要特点<sup>[4-5]</sup>如下:

(1)雨凇(Glaze Ice)的主要特点是液态水含量(Liquid Water Content, *LWC*)高,同时过冷却水滴直径较大。主要物理过程为湿增长,即一部分水滴在撞击物体表面时瞬间冻结,另一部分水滴在撞击后并未立刻冻结,而是沿着撞击物表面移动,在移动过程中逐渐冻结,最终形成一种玻璃状的高密度透明块

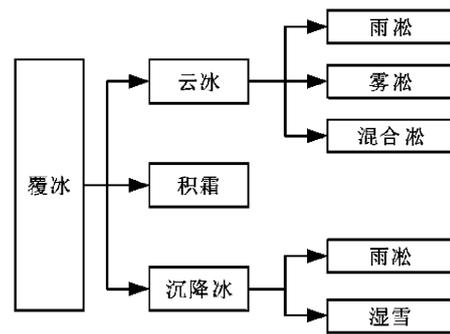


图 1 覆冰的分类<sup>[3]</sup>

状冰层(图 2a)。

(2)雾凇(Rime Ice)的主要特点是过冷却水滴直径较小。主要物理过程为干增长,即过冷却水滴撞击物体表面之后瞬间冻结,最终形成放射状的低密度且较弱附着力的结晶(图 2b)。

(3)混合凇(Mix Ice)的主要特点为雨凇与雾凇混合冻结的具有较强附着力的不透明或半透明冰层(图 2c),在自然界中常见。

### 1.2 覆冰的物理过程

过冷却水滴与风力发电机叶片发生碰撞并与其进行热量交换,进而在叶片表面形成冰层,运行中的风力发电机,由于其迎风侧接触扫过空气的面积大,因此能够捕获更多的过冷却水滴,所以风机叶片覆冰时冰层主要位于迎风侧。另外,湿增长覆冰的情况下,暂未冻结的水会在叶片上发生流动的现象,可能在流动的过程中于叶片的其他部位处发生冻结或者从叶片上流失<sup>[3]</sup>。

### 1.3 覆冰的危害

#### 1.3.1 对叶片气动性能的影响

造成叶片翼型发生变化,从而影响叶片周围的流场,严重降低叶片的空气动力特性;机组输出功率损失严重,发电效率降低,出力减少<sup>[8-12]</sup>。国外欧洲 NREL 5 MW 风力机因覆冰造成超过 20%的功率损失<sup>[13]</sup>,国内浙江地区运行的 M1500-600/150 风机,因严重覆冰,输出功率仅为额定功率的 1/5<sup>[14]</sup>,贵州地



(a)雨凇

(b)混合凇

(c)雾凇

图 2 雨凇、雾凇、混合凇覆冰特征<sup>[6]</sup>

区某风电场因覆冰而造成的发电量损失占全年发电量的 15%~20%<sup>[15]</sup>。

### 1.3.2 对机组和电网的影响

叶片载荷随着冰层厚度的增加而增加,极端情况下会造成风塔整体坍塌或局部破损。由于惯性力可能造成叶片的高幅震动<sup>[16-18]</sup>。低温运行会造成叶片、齿轮箱、轴承等传动部件寿命减少<sup>[19]</sup>。覆冰会造成并网运行风电场的非计划停机,对电网安全调度带来风险,如 2009 年瑞典因覆冰造成的停机占全年非计划停机的 92%<sup>[20-21]</sup>。

### 1.3.3 对人类生活的影响

覆冰后叶片产生的振动和噪音会影响附近区域的居民。覆冰融化松动后会发生“甩冰”现象,甚至会被抛出数百米远,对建筑物、车辆等造成危害,甚至威胁人们的安全<sup>[22]</sup>。

### 1.3.4 对风电场经济效益的影响

冬季低温周期长,风机覆冰周期增长,降低了发电量的产能。低温条件下维修人员的交通成本和设备维护成本显著增加<sup>[23]</sup>。

## 2 研究方法

风力机叶片覆冰的研究大多是基于各种覆冰软件的仿真结果与冰风洞覆冰试验结果来探讨风力机叶片覆冰的影响因子和覆冰后对风机的影响。实验方法主要为:真型风力发电机试验、冰风洞试验、数值仿真模拟和覆冰模型方法。

真型风力发电机试验能够得到最有效最真实的结果,但需要耗费大量的研究经费,所以目前有关这方面的研究较少。

冰风洞试验的主要过程是将试验场所内的气象条件设计的与真实情况相同,然后模拟真实风机叶片覆冰过程。如张毅<sup>[9]</sup>利用高压实验室的大型人工气候室进行了风机叶片覆冰试验,主要包括制冷、风速调节、喷雾等系统。通过气候室控制柜可以设置室内温度,通过喷雾系统可以对试验装置进行均匀的过冷水滴覆盖及改变试验环境下液态水含量的大小。众多学者<sup>[7,24-28]</sup>通过冰风洞试验研究了气象条件对风机叶片覆冰及覆冰类型的影响,同时还研究了不同气象条件下覆冰对风机气动性能的影响。

数值仿真模拟法是利用计算机相应的工程软件对风力机叶片翼型建立几何模型,利用有限元法划分网格,分析过冷却水滴与翼型模型的碰撞特性,完成覆冰过程的模拟仿真,该方法具有灵活使用、成本低廉的优点<sup>[10]</sup>。目前著名的结冰预测软件有美国的

LEWICE、法国的 TRAJICE、加拿大的 FENSAP-ICE 等<sup>[30]</sup>。国外学者<sup>[31-32]</sup>采用相关软件针对覆冰对风机气动性能的影响做了研究,还将软件计算结果与冰风洞试验结果进行了对比。国内学者<sup>[6,10,33]</sup>利用 fluent 软件计算风机叶片空气绕流场,得出流场中过冷却水滴主要撞击在风机叶片前缘及迎风面,因为单位时间内,叶尖处扫过的面积最大,水滴碰撞量最多。于东玮等<sup>[34]</sup>采用 FENSAP-ICE 软件分析了在雨淞型覆冰下,气象条件和叶片参数对叶片覆冰的影响。目前,预测效果最好、应用范围最广的是 LEWICE 软件,其已发展到三维空间计算,可针对风力机叶片整体进行计算<sup>[33]</sup>。

国内外关于风机叶片覆冰模型的研究较少,覆冰模型方法主要分为覆冰增长模型和经验模型。

目前常用的覆冰增长模型是基于 Makkonen 提出的物体表面覆冰模型<sup>[35-36]</sup>,主要为过冷却水滴的碰撞、捕获和冻结 3 个阶段。具体模型如下:

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w v A \quad (1)$$

式中: $M$ 为积冰质量; $\alpha_1$ 为过冷却水滴的收集系数<sup>[37]</sup>; $\alpha_2$ 为碰撞系数,当  $v < 1$  m/s,  $\alpha_2 = 1$ , 否则  $\alpha_2 = 1/v$ ;  $\alpha_3$ 为增长系数<sup>[36]</sup>; $w$ 为粒子群含水量(质量分数); $v$ 为有效粒子速度(即粒子相对于风力机的速度); $A$ 为水滴碰撞物体有效截面积; $t$ 为时间。国内学者李仲怡等<sup>[38]</sup>和许杨等<sup>[39]</sup>均基于 Makkonen 覆冰增长模型建立了广西风力机覆冰预报模型和湖北九宫山覆冰模型。

经验模型能在一定程度上反映本地区的覆冰情况,但由于各地区气象、地形差异,覆冰与气象参数的关系也各异,因此应用范围也具有局限性。董海萍等<sup>[40]</sup>利用温度和湿度,基于回归方程建立了甘肃张家川某风电场覆冰经验模型。陈彩凤<sup>[41]</sup>根据灰色关联结果,建立了单个风机装备叶片覆冰厚度的灰色关联预测模型,具体模型如下:

$$H(t) = \alpha x_1(t) + \beta x_2(t) + \gamma x_3(t) + \delta x_4(t) \quad (2)$$

式中: $H(t)$ 、 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$ 、 $x_4(t)$ 分别表示  $t$  时刻的覆冰厚度、温度、湿度、风速、水滴直径, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ 分别表示温度、湿度、风速、水滴直径的关联度。

不同的研究方法和研究内容,得到了不同的研究成果。张毅<sup>[9]</sup>和刘国特<sup>[42]</sup>将冰风洞试验和数值仿真相结合,在相同参数下对比了两种研究方法结果的差异,结果显示数值仿真结果的风机叶片覆冰程度比冰风洞试验接近或偏大,叶尖处覆冰厚度计算结果大,叶片覆冰表面极限位置略小于试验结果。覆冰

质量和气象条件关系方面,有学者基于数值仿真方法研究得到<sup>[6,34,43]</sup>:固定环境温度不变,覆冰质量和最大覆冰厚度与风速呈正相关,随着风速的增加,最大覆冰厚度增幅先迅速增大,后增幅放缓,如风速从10 m/s增大到20 m/s时,覆冰最大厚度从3~4 cm增大到6~8 cm,影响较明显;固定风速不变,覆冰质量和最大覆冰厚度与温度呈正相关,随着环境温度的降低,覆冰质量和最大覆冰厚度增幅先迅速增大,后增幅放缓;覆冰质量随MVD的增大先增大后保持不变。在覆冰起止时间的预测方面,李仲怡<sup>[38]</sup>和许杨<sup>[39]</sup>采用覆冰模型方法得出:广西北部风电场48 h时效内对覆冰过程报出率为100%,覆冰起、止时间预报误差分别为3~5 h、6~12 h;湖北九宫山风电场提前24、48、72 h覆冰开始报出率分别为68.4%、63.2%、63.2%;提前24、48、72 h覆冰结束报出率分别为79%、47%、47%。随着预报时效的延长,预报准确率会下降。目前可以通过神经网络、支持向量机等常用的算法对覆冰状态和程度进行有效的诊断预测,如熊昌全<sup>[44]</sup>采用SCADA数据,基于Bi-LSTM和SVM的覆冰状态预测模型,对叶片覆冰状态进行预测,准确率达95%;龚莎<sup>[45]</sup>采用SCADA数据,搭建叶片覆冰神经网络诊断模型,能够有效验证未覆冰、轻微覆冰、中度覆冰、严重覆冰状态。

### 3 影响风机叶片覆冰的因素

风机叶片覆冰是综合了空气动力学、热力学等的综合物理过程。主要影响因素为一定的气象条件,包括环境温度、风速、相对湿度、过冷却水滴颗粒直径MVD(Median Volume Diameter)、LWC等。地理条件的影响,包括海拔高度、坡度、坡向等。叶片自身因素的影响,包括风机叶片转速、叶片翼型、尺寸、攻角及叶片表明粗糙度等。

#### 3.1 气象条件

有学者通过冰风洞试验得出<sup>[24-25,28-29]</sup>:随着环境温度降低或者LWC、风速和相对湿度越大,风力机叶片表面覆冰越严重。当环境温度 $< -10$  °C时且空气中的水汽密度 $< 0.2$  g/m<sup>3</sup>时,覆冰类型为雾凇型,当环境温度在 $-5 \sim 0$  °C且空气中水汽密度 $> 0.2$  g/m<sup>3</sup>时,覆冰类型为雨凇型;此外覆冰时长越长,冰层越厚,覆冰速率逐渐减慢。还有学者通过数值仿真得到<sup>[3,34,41]</sup>:风速、LWC、相对湿度越大,环境温度越低,覆冰量越大。覆冰时气温范围为 $-20 \sim 0$  °C,气温低于 $-20$  °C时,空气因为寒冷而较干燥,缺少过冷却水滴不易发生结冰现象;当环境温度为 $-20 \sim -10$  °C

时,叶片表面会形成凹凸不平的冰面,当环境温度为 $-10 \sim 0$  °C时,叶片表面形成的冰面比较光滑。水滴在无风速时,易在叶尖形成冰锥,随着风速增加覆冰面积越大。MVD越大,在叶片表面形成的冰晶颗粒越大,冰面越粗糙。覆冰模型和统计方法也被用于分析气象条件对覆冰的影响,如赵斌<sup>[46]</sup>研究得出北方地区气温在 $-10 \sim 0$  °C,相对湿度达70%以上,平均风速 $\leq 6$  m/s最有利于冰冻的产生。董海萍<sup>[40]</sup>指出冬季夜晚是覆冰的高发期,雾天多,相对湿度大是导致冬季覆冰的直接原因。李仲怡<sup>[38]</sup>和许杨<sup>[39]</sup>分析得出环境温度越低,覆冰增长越快,主要以干增长为主,最大覆冰质量小,环境温度接近0 °C时以湿增长为主,最大覆冰质量大;LWC越高,覆冰速率越快;风速越大,覆冰增长越慢。

综合相关研究成果可以得到影响风力机叶片覆冰的气象条件为:(1)覆冰时的环境温度区间为 $-20 \sim 0$  °C,而 $-8 \sim -5$  °C是最佳区间,环境温度越低,覆冰速率越快;(2)叶片覆冰质量和厚度随着风速的增加呈线性增长,覆冰面积也越大,覆冰速率越慢;(3)叶片覆冰质量随着湿度的增加而增加;(4)叶片覆冰质量与LWC呈正相关关系;(5)MVD的大小主要影响覆冰的种类和结冰形状。当MVD越大,在叶片表面形成的冰晶颗粒越大,冰面越粗糙。

#### 3.2 叶片几何参数

叶片自身几何参数对叶片覆冰也产生影响。李声茂等<sup>[47]</sup>研究指出,在一定攻角范围内,风机叶片覆冰面积随着LWC和风速的增加而增加。梁健<sup>[48]</sup>指出,风机转速下降会使覆冰区域整体偏向压力面。于东玮等<sup>[34]</sup>分析了叶片厚度和攻角对覆冰生长的影响,表明在温度和风速不变的情况下,叶片的覆冰质量和最大覆冰厚度随着翼型的相对厚度和攻角的增加而增大。

#### 3.3 地理条件

地理条件影响主要体现在海拔高度的影响,通常情况下,气温随着海拔高度的升高而降低,从而通过影响环境温度而间接影响风力机叶片覆冰。除此之外,还有坡向的影响,由于太阳辐射的影响,南坡比北坡温度高,因此北坡较南坡更易出现覆冰。

### 4 覆冰对风机气动性能的影响

风机的气动性能主要是指其风能利用的性能,是风机风能转化效率的高低及其载荷大小的决定性因素<sup>[49]</sup>。Kasper Mortensen<sup>[50]</sup>和蒋立波等<sup>[32]</sup>通过数值仿真模拟方法得出,覆冰将导致叶片升阻比减小,继

而降低风力机的出力,最终影响机组的发电量。Clement Hochart 等<sup>[51]</sup>和李声茂等<sup>[47]</sup>分别通过冰风洞试验和数值仿真模拟方法得出,覆冰使叶片前缘受力增加,粗糙度变大,导致叶片气动性能恶化,甚至停机。邓杰等<sup>[52]</sup>研究表明,靠近叶尖区域升阻比降幅更大。于东玮等<sup>[54]</sup>和邓晓湖等<sup>[43]</sup>研究表明,覆冰对升力系数的影响比较大,当有覆冰时最大升力系数比无覆冰时减少近一半,阻力系数增加约 38%。何玉林等<sup>[53]</sup>分析表明,覆冰会导致叶片翼型的阻力系数增大。吴晓东<sup>[50]</sup>分析了雾凇型和雨凇型覆冰下输出功率的影响,表明风速越大,输出功率越大,覆冰程度为 10% 时雨凇型覆冰比雾凇型覆冰功率损失大 4 倍。白树华等<sup>[55]</sup>研究表明,西藏地区受空气密度影响,最大功率只为内陆地区的三分之二。杨大川<sup>[9]</sup>研究表明,同一风速下,随着覆冰的增加,风力机输出功率下降。舒立春等<sup>[7]</sup>利用冰风洞试验,模拟了不同气象条件下覆冰对输出功率的影响。随着环境温度降低,风机输出功率先降后升,使得风机到达停机前所需时间呈先减少后增多的规律; $LWC$  越高,风机输出功率越低,到达停机前所需时间越短;风速越大,风机输出功率越大,到达停机前所需时间越长。

## 5 展望

在气候变暖和“双碳”背景下,未来风电产业将持续高速发展,而风电场建成后的安全运行问题越来越得到关注。风机叶片覆冰主要受气象条件的影响,国外风电研究和发展起步较早,但由于地理、气候等原因的差异,许多研究成果无法直接应用于国内,而我国地域辽阔,不仅南北气候差异大,山区和平原也存在着差异,因此,未来的研究重点可以集中于以下几个方面:(1)加强覆冰机理研究,构建适用于本地的风机叶片覆冰模型。在模型建立中,遴选适用于本地的气象因子、地理因子等。(2)开展实测数据的收集和研究。及时收集风机实测数据,做好风机日常维护工作,同时可在风电场周围布设气象站。(3)完善和发展多种高分辨率数值预报产品。在今后的研究中,气象要素的预测准确率是重中之重,要结合不同模式不同数值预报产品开展研究。(4)数值预报产品订正方法研究。结合实测风机数据和气象站数据,运用多样化订正技术,开展数值预报订正工作。

### 参考文献:

[1] 邱刚.风力发电机叶片电加热融冰过程及其数值模拟[D].重庆:重庆大学,2018.

- [2] GWEC.2021 年全球风能报告[R].GWEC,2021.
- [3] 杨大川.叶片覆冰对风力机功率特性的影响[D].重庆:重庆大学,2019.
- [4] 张毅.小型风力发电机叶片覆冰的数值仿真及试验研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [5] 黄治娟,胡志光,张秀丽.等.风机叶片防覆冰技术研究[J].华北电力技术,2014(6):16-19.
- [6] 杨爽.风力发电机叶片覆冰的仿真分析及试验验证[D].重庆:重庆大学,2015.
- [7] 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.
- [8] 王晓东.金紫山风电场冬季安全生产管理经验浅谈[J].红水河,2014,33(4):92-94.
- [9] 杜景怡.基于 FEVE 树脂体系的风棚叶片抗结冰涂料的设计[J].涂料技术与文摘,2013,34(11):36-41.
- [10] VIRK M S,HOMOLA M C,NICKLASSON P J.Effect of rime ice accretion on aerodynamic characteristics of wind turbine blade profiles[J].Wind Engineering,2010,34(2):207-218.
- [11] LAMRAOUI F,FORTIN G,BENOIT R,et al.Atmospheric icing impact on wind turbine production [J].Cold Regions Science and Technology,2014,100:36-49.
- [12] 安利强,王鹏,常明,等.叶片覆冰对抗冰冻机组疲劳载荷的影响研究[J].可再生能源,2018,36(1):78-84.
- [13] M C HOMOLA, M S VIRK, P J NICKLASSON, et al. Performance losses due to ice accretion for a 5 MW wind turbine[J].Wind Energy,2012,15(3):379-389.
- [14] ALSABAGH, A S Y, WILLIAN T, XU YG, et al.A review of the effects of ice accretion on the structural behavior of wind turbines [J].Wind Engineering,2013,37(1):59-70.
- [15] 李小军,潘华,韩爽,等.贵州地区风电机组覆冰原因及甩冰风险分析[J].风能,2014(9):96-99.
- [16] 孙少华,徐洪雷,符鹏程,等.叶片覆冰对风电机组的影响[J].风能,2014(9):100-103.
- [17] DALILI N, A EDRISY A, Carriveau R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009(13):430.
- [18] 陈彩凤,杨杰,成斌,等.覆冰条件下旋转风力机叶片应力与模态分析[J].玻璃钢/复合材料,2018(7):26-30.
- [19] ETEMADDAR M, HANSEN M O L, MOAN T.Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions[J].Wind Energy,2014,17(2):241-265.
- [20] 梁健.风力机叶片覆冰预测模型研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [21] HU L,ZHU X,HU C,et al.Wind turbines ice distribution and load response under icing conditions [J].Renewable

- Energy, 2017, 113: 608–619.
- [22] LEHTOMIHKI V, HETMANCZYK S, DURSTEWITZ M, et al. Iced blades – modeling of ice accretion on rotor blades in a coupled wind turbine tool [J]. Proceedings of Winterwind, 2012: 55–67.
- [23] 池昊. 基于数据驱动的风力发电机叶片结冰诊断与预测方法研究[D]. 长沙: 湖南工业大学, 2019.
- [24] LOWER H. Aircraft icing handbook [M]. Civil Aviation Authority, New Zealand, 2000: 62–66.
- [25] CATTIN R, RUSSI M, RUSSI G. Four years of monitoring a wind turbine under icing conditions [C]. proceedings of IWAI 2009, Andermatt, Switzerland, 2009.
- [26] ANDREA G, ERIC L. Phases of icing on wind turbine blades characterized by ice accumulation [J]. Renewable Energy, 2010, 35: 966–972.
- [27] JASINSKI W J, NOE S C, SELIG M S, et al. Wind turbine performance under icing conditions [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1998, 120(1): 60–65.
- [28] 李强, 李岩, 冯放, 等. 小型水平轴风力机导流罩结冰的风洞试验[J]. 可再生能源, 2013, 31(6): 66–69.
- [29] 李录平, 刘胜先, 谭海辉, 等. 气温和空气湿度对桨叶覆冰特性影响的实验研究[J]. 热能动力工程, 2012, 27(5): 610–614.
- [30] 吴佩佩, 朱春玲, 刘文平, 等. 过冷大水滴条件下机翼结冰数值仿真[J]. 计算机仿真, 2014(9): 51–55.
- [31] 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, 2003: 6–9.
- [32] HUDECZ A, KOSS H, HANSEN M O L. Ice accretion on wind turbine blades [C]. 15th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAI XV), 2013.
- [33] 蒋立波. 冰冻对风力机气动性能的影响及应对研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [34] 于东玮, 司广全, 孔祥逸, 等. 风机叶片覆冰机理与预测分析[J]. 计算力学学报, 2021, 38(3): 327–336.
- [35] MAKKONEN L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2000, 358 (1776): 2913–2939.
- [36] MAKKONEN L. Modeling of ice accretion on wires [J]. Journal of Applied Meteorology, 1984, 23(6): 929–939.
- [37] FINSTAD K J, LOZOWSKI E P, GATES E M. A computational investigation of water droplet trajectories [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1988, 5 (1): 160–170.
- [38] 李仲怡, 叶庚姣, 卢小凤, 等. 基于 Makkonen 结冰增长模型的风力机覆冰预报 [J]. 广东电力, 2020, 33(10): 127–133.
- [39] 许杨, 陈正洪. 风电场风机覆冰期预报方法 [J]. 气象科技, 2021, 49(6): 934–940.
- [40] 董海萍, 陈宇升, 董建兵, 等. 张家川风电场覆冰环境制约机理研究 [J]. 风能, 2020(6): 78–83.
- [41] 陈彩凤. 新疆风电装备叶片覆冰影响因素分析及覆冰预测 [D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
- [42] 刘国特. 风力发电机叶片覆冰预测与覆冰对机组出力影响研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [43] 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.
- [44] 熊昌全, 何泽其, 张宇宁, 等. 基于 Bi-LSTM 和支持向量机的风机叶片短期覆冰状态预测模型 [J]. 四川电力技术, 2021, 44(3): 88–94.
- [45] 龚莎. 基于 BP 神经网络的风力机叶片覆冰状态诊断技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [46] 赵斌, 陈红宝, 王嘉媛. 甘肃风电开发气象灾害因素研究 [J]. 水利规划与设计, 2020(4): 78–81.
- [47] 李声茂. 结冰对直线翼垂直轴风力机气动特性影响研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- [48] 梁健. 风力机叶片覆冰预测模型研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [49] 任晓凯. 小型风力发电机叶片覆冰的气动力学特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [50] KASPER M. CFD simulations of an air foil with leading edge ice accretion [D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2008.
- [51] HOCHART C, FORTIN G, PERRON J, et al. Wind turbine performance under icing conditions [J]. Wind Energy, 2010, 11(4): 319–333.
- [52] 邓杰, 羊森林, 杨广磁, 等. 覆冰对风电机组叶片气动性能的影响研究 [J]. 东方电气论坛, 2019, 33(132): 38–41.
- [53] 何玉林, 李俊, 董明洪, 等. 冰载对风力机性能影响的研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(9): 1490–1496.
- [54] 吴晓东. 风力发电机覆冰条件下的功率特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [55] 白树华, 卢继平. 西藏高原的气候环境对风力发电的影响分析 [J]. 电力建设, 2006, 27(11): 37–40.