

引用格式:陈正洪,贺莉微.风电场风机覆冰气象研究及预警服务[J].内蒙古电力技术,2025,43(2):3-11.

CHEN Zhenghong, HE Liwei. Meteorological Research and Early Warning Services for Wind Turbine Icing in Wind Farms[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2025, 43(2): 3-11.

## 风电场风机覆冰气象研究及预警服务

陈正洪<sup>1,2</sup>,贺莉微<sup>1,2</sup>

(1.湖北省气象服务中心,武汉 430074;2.湖北省气象能源技术开发中心,武汉 430074)

**摘要:**风机覆冰是影响风电场的最严重的自然灾害,影响风机覆冰的气象因素主要有环境温度、风速、相对湿度、水滴粒子直径等。湖北、广西、江西、陕西等省级气象部门陆续开展了风机覆冰影响评估和预报预警的技术研究和专业服务,如建立新能源气象服务数据库、搭建风机覆冰气象服务平台、构建风机覆冰预报模型、进行风机覆冰实验与数值模拟等,并取得了成效,对提高风电场防御气象灾害的能力、有效保障风电场安全运行起到积极的作用。建议气象部门未来重点开展风机覆冰监测、评估及预报(含功率预测)全链条气象研究,研发更具有针对性的风机覆冰气象服务产品及除冰设施等。

**关键词:**风电场;风机覆冰;覆冰消融;覆冰模型;气象预警

文献标志码:B

文章编号:1008-6218(2025)02-0003-09

中图分类号:TK83;TM614

doi:10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0016

## Meteorological Research and Early Warning Services for Wind Turbine Icing in Wind Farms

CHEN Zhenghong<sup>1,2</sup>, HE Liwei<sup>1,2</sup>

(1.Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430074, China;

2.Hubei Meteorological Energy Technology Development Center, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Wind turbine icing is one of the most severe natural disasters affecting wind farms. The meteorological factors influencing wind turbine icing mainly include environmental temperature, wind speed, relative humidity, and droplet particle diameter. Meteorological departments in provinces such as Hubei, Guangxi, Jiangxi, and Shaanxi have successively conducted technical research and professional services for wind turbine icing impact assessment, forecasting, and early warning, such as establishing meteorological service databases for new energy, developing wind turbine icing platforms, constructing wind turbine icing forecasting models, and conducting icing experiments and numerical simulations, all of which have yielded positive results. These initiatives play a significant role in enhancing the ability of wind farms to defend against meteorological disasters and effectively ensuring their safe operation. It is recommended that meteorological departments prioritize comprehensive meteorological research on the entire chain of wind turbine icing monitoring, assessment, and forecasting(including power prediction) in the future, as well as develop more targeted meteorological service products and de-icing facilities or measures.

**Key words:**wind farm; wind turbine icing; icing melting; icing model; meteorological early warning

### 0 引言

风能作为一种储量丰富且分布广泛的自然资源,是清洁、可再生的能源之一<sup>[1-3]</sup>。风能的使用在

减少碳排放、改善空气质量等方面具有明显优势,是实现能源转型和可持续发展目标的重要手段。随着技术进步和成本降低,中国已成为全球最大的风电市场<sup>[4-5]</sup>。自2006年以来,中国风电行业经历了

爆发式增长,现已成为国内第三大电源,截至2024年6月可再生能源装机容量首次超过了煤电,其中风光发电已成为新增投产电源的主力。截至2024年9月底,全国风电累计装机容量为4.67 GW<sup>[6]</sup>。预计全球新增风电装机容量未来仍将保持15%以上的复合增长率,到2060年有8~10倍巨大增长空间,中国风电的新增装机容量预计在较长时间内将继续占全球市场50%以上<sup>[7]</sup>。

随着风电场的大量兴建,装机容量大幅提高,气象灾害对风电场的影响逐步显现,其中风机覆冰已成为风电场最严重的自然灾害<sup>[8-10]</sup>。当前国内外学者针对风机覆冰开展了大量研究,主要从影响风机覆冰的气象条件出发,基于统计学方法<sup>[11-12]</sup>、数值仿真和冰风洞试验<sup>[13-15]</sup>等方法,归纳总结影响风机覆冰的气象要素阈值,同时在筛选气象因子的基础上,建立风机覆冰和融冰模型,对未来一段时间内的风机覆冰做出预测<sup>[16-18]</sup>。人工智能方法<sup>[19-24]</sup>多用于风机功率预测方面,近几年也有不少学者用于风机覆冰预测,如龚妙等<sup>[25]</sup>建立了叶片覆冰BP神经网络预测模型,该模型预测结果最大相对误差为3.926%,表现良好。孟杭等<sup>[26]</sup>提出结合随机森林和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的风机叶片结冰监测方法,融合模型预测准确性可达99.05%。叶林等<sup>[27]</sup>提出了一种寒潮天气小样本下短期风功率预测方法,基于XGBoost和Transformer算法建立风电功率基准值和损失值预测模型。

近年来全国一些省级气象部门也陆续开展了风机覆冰影响评估和预报预警的技术研究和专业服务,提出针对性防御对策,对提高风电场防御气象灾害的能力、有效保障风电场安全运行,起到积极的作用。本文总结了多个省份气象部门近年来针对风电场风机覆冰气象研究和服务现状以及取得的成效,并对未来发展方向进行展望。

## 1 风机覆冰概述

### 1.1 风机覆冰的主要类型及分区

过冷却水滴在空气流场中与旋转的风力发电机叶片发生碰撞,其中被捕获的部分过冷却水滴与空气及风机叶片进行热量交换,并发生过冷却水滴的蒸发及冻结,进而在其表面形成冰层。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现象,可能在流动过程中于叶片的其他部位处发生冻结或从叶片上流失。根据国际标准 ISO

12494:2017《大气结构的结冰》,按照覆冰的物理形成过程及形成条件,可分为雨淞、雾淞和混合淞。雨淞形成的覆冰密度较大,与叶片表面的黏结力较强,对叶片的机械负荷与气动性能的影响最大;雾淞形成放射状的结晶,密度较小,具有较弱的附着压力;混合淞为雨淞与雾淞混合冻结的不透明或半透明冰,具有较强的附着压力。在自然界下,通常为雨淞型和雾淞型交替增长<sup>[5]</sup>。

在不同气候环境、地形条件影响下,风机叶片工作中会形成质地不同、形状各异的覆冰,不同区域的风机叶片覆冰过程和特征存在很大差异,考虑风机覆冰与电线积冰在形成机理的一致性,采用气象行业标准 QX/T 355—2016《电线积冰气象风险等级》<sup>[28]</sup>中全国电线积冰类型分区图作为风电场风机覆冰类型分区,河南、浙江和福建为混合型区,湖北、重庆、云南、贵州、广西、广东、湖南、江西为雨淞型区,除西藏、海南、台湾无资料外,国内其他省份为雾淞型区。

### 1.2 影响风机覆冰的主要气象因素及规律

根据国内外众多学者研究,影响风机覆冰的气象因素主要包括环境温度、风速、相对湿度、液态水含量和水滴粒子直径,通常情况下应具备以下条件:

- (1) 覆冰时的环境温度区间为 $-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而 $-8\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是最佳区间,环境温度越低覆冰速率越快<sup>[14]</sup>;
- (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<sup>[13,29]</sup>;
- (3) 叶片覆冰质量随着湿度的增加而增加<sup>[30]</sup>;
- (4) 叶片覆冰质量与液态水含量呈正相关关系<sup>[15,31]</sup>;
- (5) 过冷却水滴粒子直径的大小主要影响覆冰的种类和结冰形状。水滴粒子直径越大,在叶片表面形成的冰晶颗粒越大,冰面越粗糙<sup>[32]</sup>。

## 2 各省份气象预警服务实践

为提升新能源气象灾害预警服务能力,全国多个省份气象局、科研院所及高等院校结合省内风电场气象灾害调查结果、风电场运行数据、多源信息融合的气象灾害精细化监测数据和高精度数值预报产品,从风电场运行数据和气象数据的清洗、影响风电场的气象因素、风机覆冰气象影响等级预报、风机覆冰模型研究、新能源气温降尺度精细化

预报研究和极端天气条件下新能源发电运行状态预测研究等多个方面开展了新能源气象预警服务关键技术研究。

## 2.1 建立新能源气象科研和服务数据库

数据是支撑科研和服务的基础,目前许多省份都采集整理了本省运行风电场的基础信息数据、极端天气引发的灾情数据和实况数据、风电场周边气象站实况监测数据等,利用数据融合可视化技术、多源异构数据标准化处理技术和数据清洗技术等多个核心技术,构建了本省新能源气象服务数据库。基于新能源服务数据库,从能源生产、能源供给和能源消费不同阶段对气象服务的需求出发,开展风机覆冰、新能源功率、70~100 m大风、电线覆冰的定制化预报服务,从产-供-消全产业链寻求气象与能源融合互助路径。

## 2.2 基于气象影响的风机覆冰灾害风险区划

湖北省气象服务中心在建立风机覆冰预报模型的基础上,采用欧洲中心ERA-Interim再分析资料,绘制湖北省年平均风机覆冰时间、覆冰频次时空分布图(见图1)<sup>[16]</sup>。风机覆冰频次空间分布图与发生时间分布图大体分布基本一致,局部存在差异,相较于平原地区,山区风机覆冰更严重;鄂西南风机覆冰发

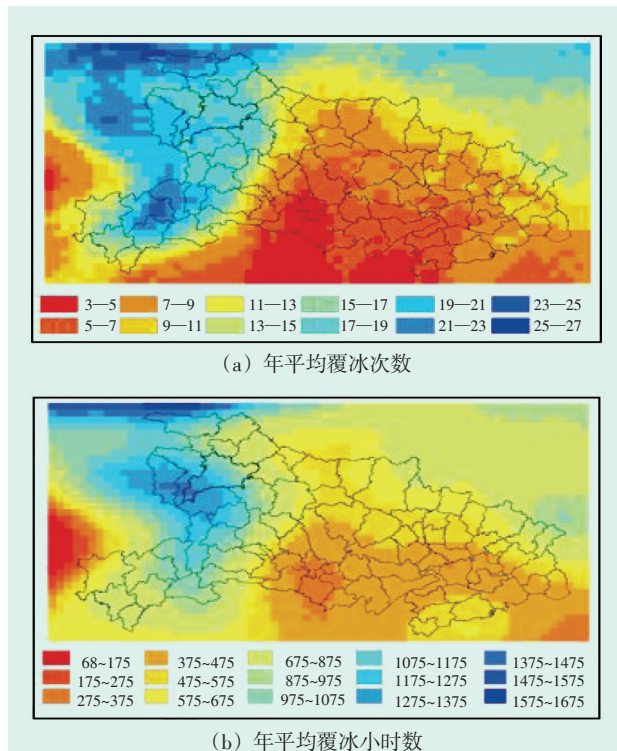


图1 湖北省风机年平均覆冰频次和年平均覆冰时间空间分布

Fig.1 The spatial distribution of annual average icing frequency and time for wind turbines in Hubei province

生频次大、持续时间较西北少<sup>[22]</sup>。

广西气象灾害防御技术中心结合风机覆冰灾害数据,建立了低温气象灾害区划模型。对影响新能源的天气致灾因子、孕灾环境、承灾体特征进行分析,基于层次分析法等方法构建了风险评价指标体系,利用加权综合评价法构建了气象灾害综合风险指数,并利用空间分析技术绘制出低温灾害风险等级图。由分析结果可知,广西风电场低温冰冻灾害主要集中在东北部地区,中南部风险最低。

## 2.3 构建风机覆冰预报模型

### 2.3.1 湖北

湖北省气象服务中心依托多个项目支撑,基于多种方法建立了风机覆冰预报模型,预报效果较好。

#### 2.3.1.1 基于Makkonen方法的覆冰模型

考虑针对风机旋转时气流的相对速度,在国内首次将Makkonen结冰增长模型与辐射融冰模型相结合,开展覆冰消融的全过程预报,以咸宁市九宫山风电场为例,覆冰开始和消融提前1 d的两次过程报出率分别为70.0%和80.0%<sup>[16]</sup>,并对两次典型过程进行了检验,结果见图2,气温0℃以下是覆冰开始的必要条件,但不是唯一条件,0℃以上作为融冰条件仅能判断覆冰开始融化,但不能预报覆冰融化时间,镶嵌融冰模型的覆冰预报模型考虑覆冰量和融冰速率,在覆冰结束时间预报上较阈值法优势更明显<sup>[22]</sup>。

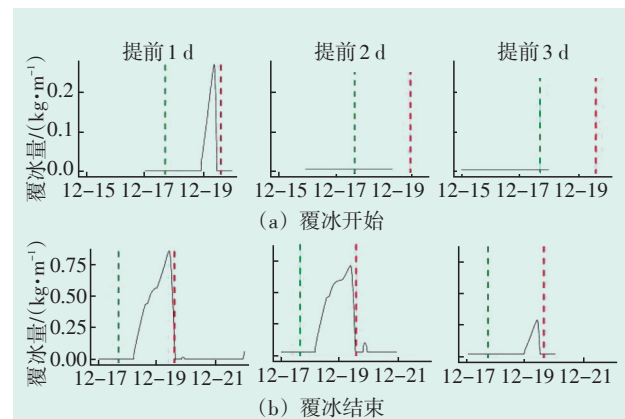


图2 提前1 d、2 d、3 d预报的覆冰开始和结束时间及覆冰量

Fig.2 The predicted start and end times, as well as the amount of ice cover, for the two processes of 1 d, 2 d, and 3 d in advance

#### 2.3.1.2 基于Adaboost机器学习、逻辑回归和Fisher判别3种不同方法的覆冰模型

利用Adaboost机器学习、逻辑回归和Fisher判别3种方法分别建立风机覆冰发生、消融判别模型

并检验,结果显示,利用Adaboost机器学习方法建立模型模拟准确率远高于其他两种方法,覆冰发生模型和消融模型准确率均超过90.0%。

### 2.3.2 广西

广西气象灾害防御技术中心提出一种基于深度学习的风电场覆冰损失容量预测方法,在Makkonen结冰增长模型的基础上,利用主成分因子分析法从若干与风机覆冰相关的气象要素中甄选输入因子,评估多种人工智能方法在覆冰时间预测中的表现能力,优选最佳覆冰时间预测方法对风机覆冰运行状态进行预测,最终构建基于复合深度神经网络(Composite Deep Neural Network, CDNN)的风机覆冰损失容量预测模型,目前该模型已经应用在业务工作中,取得了良好的服务效果。

### 2.3.3 河南

河南省气象服务中心实现了对风机叶片覆冰的准确识别,并基于中国气象局自主研发的新能源专业预报模式(CMA-WSP)开展预测,在2023年冬季雨雪冰冻期间,电网端试运行显示,预测准确率平均提高了20%以上。除了风机覆冰,还基于Makkonen覆冰模型和云降水显式预报系统的数据,结合机器学习方法构建微地形微气象输电线路覆冰预测模型;与国家电网有限公司河南分公司合作,构建覆冰、舞动、风偏、高温大负荷等气象风险预报预警模型,提供细化到杆塔级别的风险预警服务。

### 2.3.4 陕西

陕西省气象服务中心基于风电场覆冰实况数据和覆冰对应时段气象要素及大气环流形势变化时空特征,利用统计学方法和相关性分析法优选影响风机叶片覆冰的关键气象因子,包括地面温度、850 hPa温度露点差、地面及850 hPa相对湿度、850 hPa风速,运用经验分析法建立风险预测模型。表1为覆冰风险预测模型气象指标。对模型进行检验,检验结果显示,2023-02-09受覆冰影响的风机主要集中在陕北大部,宝鸡西部、咸阳、铜川个别风电场受到影响,模型预报在陕北大部、铜川显示覆冰中风险区域,陕北西部、宝鸡西部、咸阳北部显示为覆冰高风险区域,其范围大小与实况较为一致(见图3)。

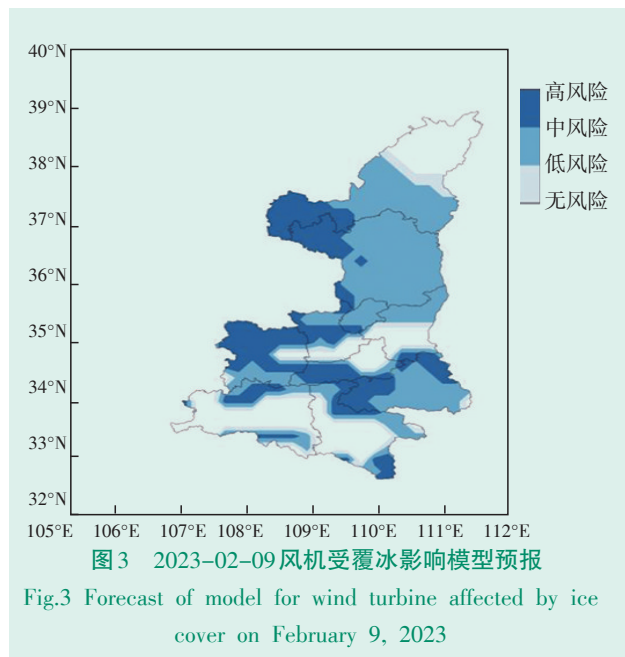
### 2.3.5 江西

江西省气象科学研究所通过数值模拟可估算风电场风机叶片覆冰时间。结果显示,采用最优参数化方案组合模拟一年测风塔数据及气象站观测数据,对温度、湿度、风速、风向模拟效果较好,但均有一定的偏差;对降雨的模拟效果欠佳,其中漏报率偏

表1 覆冰风险预测模型气象指标

Tab.1 List of meteorological indicators for ice cover risk prediction model

气象因子	预报时间(D为覆冰发生日)	气象指标
地面温度	D-1 20:00	$\leq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$
850 hPa温度露点差	D-1 20:00	$\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
地面相对湿度	D-1 20:00	$\geq 80\%$
850 hPa相对湿度	D-1 20:00	$\geq 70\%$
850 hPa风速	D-1 20:00	$\leq 7\text{ m/s}$



大。表2为采用最优参数化方案组合对某2号、3号测风塔温度的模拟结果,可以看出,对四个季节模拟相关系数介于0.81~0.96,而均方根误差介于1.44~1.69 $^{\circ}\text{C}$ ,平均绝对误差介于1.83~2.15 $^{\circ}\text{C}$ ,全年平均相关系数均高于0.91,均方根误差分别为1.54 $^{\circ}\text{C}$ 和1.49 $^{\circ}\text{C}$ ,平均绝对误差分别为1.96 $^{\circ}\text{C}$ 和1.88 $^{\circ}\text{C}$ 。表3为采用最优参数化方案组合对2号、3号测风塔逐时风速的模拟结果,可以看出,四季模拟效果差别较小,夏季相关系数优于其他季节,秋季误差较其他季节最小<sup>[33]</sup>。

由以上分析可以看出,利用气象模式模拟结果对覆冰形成进行判别的方法可行,随着模式本地化应用水平的提高,其模拟效果还有较大的提升空间。

## 2.4 风机覆冰实验与数值模拟

湖北省气象服务中心与武汉大学、湖北工业大学联合开展了丘陵山区风机叶片覆冰增长和消融过程机理的研究。依托湖北省融雪化冰工程中试基地、生态道路工程技术研究中心和湖北工业大学大型步入式低温恒温试验场地,揭示风机叶片覆冰增

表2 2号、3号测风塔逐小时温度模拟结果<sup>1)</sup>

Tab.2 Test results of hourly temperature simulation effect for tower 2 and tower 3

季节	2号			3号		
	R	M <sub>AE</sub> /°C	R <sub>MSE</sub> /°C	R	M <sub>AE</sub> /°C	R <sub>MSE</sub> /°C
春	0.93	2.15	1.69	0.89	2.00	1.67
夏	0.81	1.83	1.45			
秋	0.96	1.89	1.44	0.95	1.95	1.58
冬	0.94	1.97	1.56	0.94	1.70	1.21
年均	0.91	1.96	1.54	0.93	1.88	1.49

注:1) R表示相关系数;M<sub>AE</sub>表示平均绝对误差;R<sub>MSE</sub>表示均方误差。

表3 2号、3号测风塔逐小时风速模拟结果

Tab.3 Test results of hourly wind speed simulation effect for tower 2 and tower 3

季节	2号			3号		
	R	M <sub>AE</sub> /°C	R <sub>MSE</sub> /°C	R	M <sub>AE</sub> /°C	R <sub>MSE</sub> /°C
春	0.72	2.3	1.7	0.65	2.4	1.8
夏	0.79	2.3	1.8	0.79	2.4	1.8
秋	0.71	2.5	1.8	0.63	2.2	1.6
冬	0.62	2.5	1.9	0.55	2.2	1.8
年均	0.71	2.4	1.8	0.66	2.3	1.7

长和消融过程的机理,实现对风机叶片覆冰预测的数值模拟,为风机除冰及安全运行提供理论依据。

从图4可以看到,在3~5 m/s的实际风速范围内,随风速的增加,叶片覆冰厚度增加趋势减缓,因为风速越大,空气中的水滴也加快碰撞到风机叶片,使表面收集到更多的过冷水滴,导致覆冰更严重,但由于风速变大,风机叶片转动频率越大,可能导致叶片积冰的形成受阻和已形成的冰由于惯性脱落;水滴中值直径从30 μm增至50 μm时,叶片表面的结冰量和结冰厚度随之增加,细小的水滴形成大水珠在风机叶片上快速运动,不利于积冰的形成。

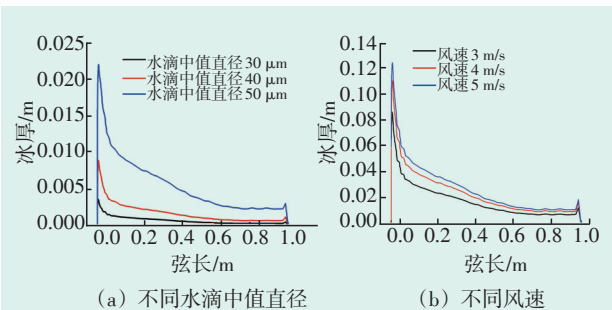


图4 不同风速和水滴中值直径下叶片表面冰厚

Fig.4 Ice thickness on blade surface under different wind speeds and median diameter of water droplets

### 2.5 搭建新能源气象服务平台

广西气象灾害防御技术中心自2019年以来为

电力部门提供短期、中长期风机覆冰气象服务,制订防冰预案、安排融冰工作、提供技术支撑,在风电优化调度安排、防灾减灾、保障增益等方面提供重要决策依据。2023年构建广西全区风电凝冰容量受限预测模型,首次提供逐小时精确到每台风机的凝冰容量损失预测,2023年12月15日至23日极端寒潮天气过程24 h预测准确率介于75%~88%,误差整体呈下降趋势(见图5)<sup>[34]</sup>。

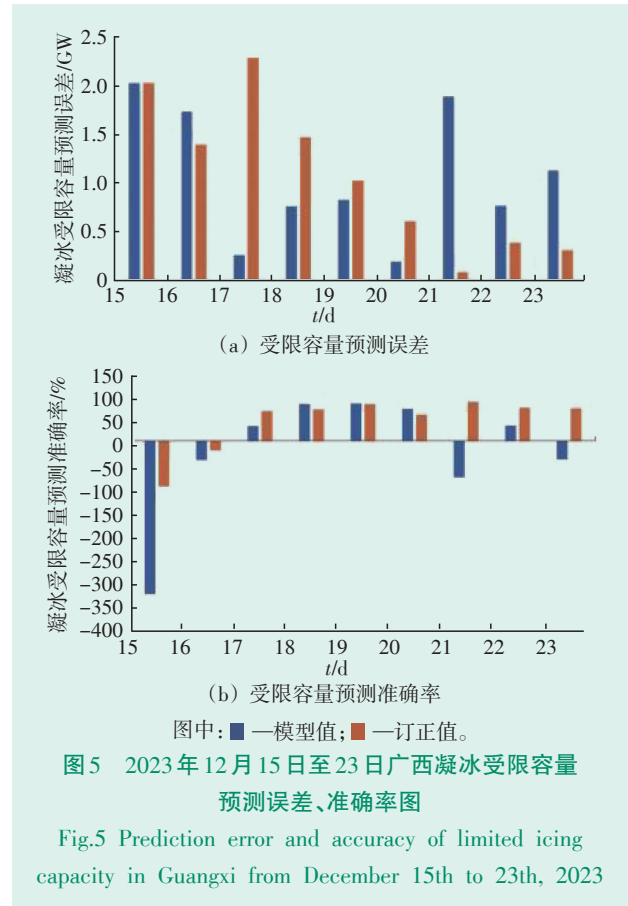


图5 2023年12月15日至23日广西凝冰受限容量预测误差、准确率图

Fig.5 Prediction error and accuracy of limited icing capacity in Guangxi from December 15th to 23th, 2023

### 2.6 编制风机覆冰气象风险评估技术指南

2024年11月,中国气象局预报与网络司颁布了由湖北省气象服务中心牵头完成的《风电机组覆冰影响评估气候可行性论证技术指南》(以下简称《指南》),广西、陕西、河南等省气象部门及相关能源公司参与完成。《指南》编制目的是提高风电场气象防灾减灾能力,促进工程设计、建设及运营过程中风电机组覆冰影响评估的科学性和规范性,适用范围为我国陆上风电场在规划设计、工程建设及运营维护等阶段的风电机组覆冰影响评估等。《指南》内容包括风电机组覆冰的关键气象因子、评估流程(见图6)、评估内容与方法(包含覆冰探测及调查、资料收集种类、评估分析内容)等。

编制单位组织全国多个省份气象部门开展了

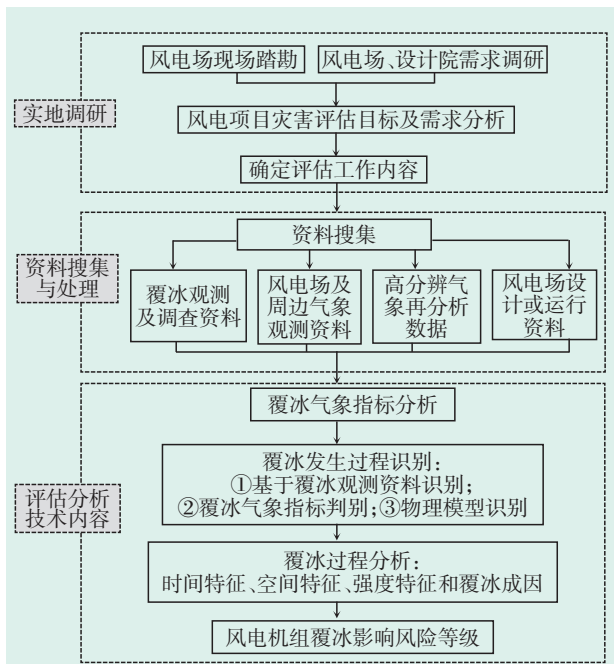


图6 风电场风机覆冰影响评估工作流程图

Fig.6 Workflow diagram for assessing the impact of icing on wind turbines in wind farms

覆冰发展和消融的气象指标及覆冰前后的变化趋势分析(见表4),结果表明,随着纬度上升,风机覆冰发生和消融的气温从 $2^{\circ}\text{C}$ 降至 $-3^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度从90%以上下降到65%,通常覆冰发生时风速较大,在 $0\sim 8\text{ m/s}$ ,消融时在 $0\sim 4\text{ m/s}$ 。另外风机覆冰发生时往往对应一次冷空气或寒潮天气过程,伴随着气温急剧下降、相对湿度快速上升、风速持续较大;覆冰消融时往往对应天气转好或晴好的天气,伴随着气温上升,相对湿度快速下降、风速减小或较小,风电机组覆冰开始阶段和消融阶段敏感气象要素变化规律概化模型图如图7所示<sup>[35-40]</sup>。

表4 不同区域风电机组覆冰发展和消融的气象指标及覆冰前后的变化趋势

Tab.4 Meteorological indicators for the development and melting of ice on wind turbines in different regions and the changing trends before and after icing

区域	覆冰阶段	气温		相对湿度		风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
		范围/ $^{\circ}\text{C}$	变化	范围/%	变化	
华南 (广西)	发生	$\leq 2$	下降	$\geq 90$	不变或略微下降	4~13
	消融	$\geq 2$	上升	$\leq 90$	下降	1~6
华中 (湖北、河南)	发生	$\leq 2$	下降	$\geq 85$	上升	4~8
	消融	$\geq 2$	上升	$\leq 85$	下降	1~4
西北 (陕西)	发生	$\leq -2$	下降	$\geq 80$	上升	2~8
	消融	$\geq -2$	上升	$\leq 80$	下降	0~4
东北 (黑龙江)	发生	$\leq -3$	下降	$\geq 65$	上升	0~7

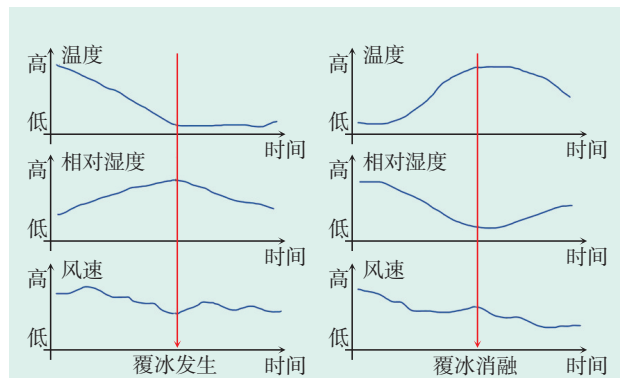


图7 风电机组覆冰开始阶段和消融阶段敏感气象要素变化规律概化模型图

Fig.7 Generalized model diagram of changes in sensitive meteorological elements during the initial and melting stages of wind turbine icing

### 3 覆冰气象服务成效

广西气象灾害防御技术中心以风机覆冰产品为支撑,签订服务合同4份,支撑172期风机覆冰服务材料制作,成果推广至广西电网、金紫山、古田、马家、坵坪、月亮山、福家田、隘门界、怀山等风电场,保障冬季新型电力系统安全稳定运行。风机凝冰容量受限预测产品应用于7家风电场,在广西电网、国家电力投资公司推广。

2022年11月至2024年3月桂林地区重点风电场出现13次风机覆冰过程,覆冰停机开始时间预报平均误差为 $2.5\sim 5.3\text{ h}$ ,其中83.3%风电场平均误差控制在 $5\text{ h}$ 以内。各风电场的覆冰过程报出率为85%~100%,覆冰日报出率为92.5%~94.7%,日最大停机数量预报平均误差为12.1%~18.5%,平均准确率为85.3%。期间覆冰容量受限平均为1138 MW,最大风机覆冰容量受限为5439 MW,出现在2024年1月23日凌晨。大部分时间覆冰容量受限预测误差低于500 MW,平均覆冰容量受限预报的平均绝对误差为233 MW,准确率约为83.3%,2023年11月至2024年3月风机覆冰受限容量预报和预报误差如图8所示。

2023年迎峰度冬能源保供期间,河南省气象服务中心首次将符合气象标准的观测设备安装在覆冰易发线路,并且在风机覆冰最严重时期,投入电网公司保电应急小组,深入汉郑线覆冰最严重区段,逐基塔开展杆塔、线路覆冰观测分析、等值覆冰测量、气象监测等工作,实时研判线路风险。12月12日到14日期间,河南省风机覆冰停运容量居各省

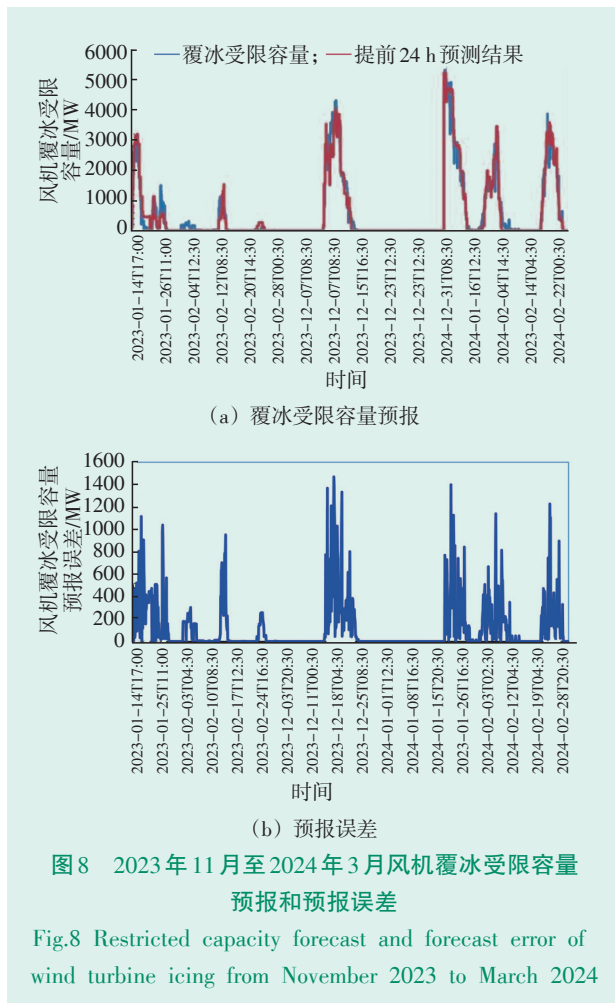


Fig.8 Restricted capacity forecast and forecast error of wind turbine icing from November 2023 to March 2024

公司之首,电力、气象部门联合开展风机覆冰停运实时统计与功率预测修正。据电网公司统计,修正后新能源功率预测准确率较之前提高2.6%,预测日偏差平均减少950 MW,有力支撑了雨雪冰冻期间电力调度<sup>[41-44]</sup>。

## 4 未来研究方向

在“双碳”背景下,未来风电产业将持续高速发展,随着风机装机容量的快速增长,风机覆冰问题不容忽视,而目前全国气象部门对于风机覆冰的气象研究还刚起步,现有科研成果还缺乏深度和广度,没有系统性、针对性的风机覆冰气象服务产品,无法满足服务需求。未来气象部门需要从以下方面重点开展研究。

(1) 开展文献收集、实地调研和深入交流,了解电网公司、风电场关于风机覆冰问题对气象服务的迫切需求。

(2) 开展风机覆冰监测、评估及气象预报(含功率)全链条气象研究。可在风电场布设气象站,

开展风机覆冰观测,同时收集整理风电场风机运行参数,为研究工作提供数据支撑。

(3) 开展全国气象系统的大协作,并联合能源企业、电网公司、高校院所等部门共同开展现场试验或试验研究。

(4) 研发更具有精细、精准及更具针对性的风机覆冰气象服务产品,积极开展风机除冰技术装备研发及除冰措施的试验,将气象预报评估与除冰化冰工作紧密结合。

### 参考文献:

- [1] Zeyringer M, Price J, Fais B, et al. Designing low-carbon power systems for Great Britain in 2050 that are robust to the spatiotemporal and inter-annual variability of weather[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(5): 395-403.
- [2] 陈祉叶,曾嘉伟,王怡静,等.“双碳”目标下中国风力发电的潜力预估、电力传输与能量储存的影响[J].*科技导报*,2024,42(19):47-58.  
CHEN Zhiye, ZENG Jiawei, WANG Yijing, et al. Capacity of wind power generation and impacts of electricity transmission and energy storage on achieving "dual carbon" goal in China [J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(19): 47-58.
- [3] SU K, JIANG L P, LIU J Z. Power source - power grid coordinated typhoon defense strategy based on multiagent dynamic game theory[J]. *Global Energy Inter Connection*, 2021, 4(3): 285-294.
- [4] GWEC.2021年全球风能报告[R].南宁:GWEC,2021.
- [5] 贺莉薇,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.  
HE Liwei, CHEN Zhenghong, LI Jinjian. Advance on Meteorological Conditions and Icing Models of Wind Turbine Blades in Wind Farm[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2023, 17(3): 1-7.
- [6] 中国财经网.可再生能源装机规模实现新突破[EB/OL].(2024-11-20)[2025-01-15].<http://finance.china.com.cn/industry/energy/2024120/6187869.shtml>.
- [7] 资产信息网.2024年中国风电行业研究报告[EB/OL].(2024-02-24)[2025-01-15].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791681146958198896&wfr=spider&for=pc>.
- [8] LAC RO IXA, MAN WELL J F. Wind energy: Cold Weather Issues[R]. Amherst: University of Massachusetts at Amherst Renewable Energy Laboratory, 2000.
- [9] 张康,孙国文.电力保供的当下之计与长远之策[J].*中国电力企业管理*,2022(7):57-59.  
ZHANG Kang, SUN Guowen. Current and long-term. strategies for power supply assurance[J]. *China Power Enterprise Management*, 2022(7): 57-59.
- [10] 郑婷婷,单小雨,马继涛,等.寒潮天气对风电运行和功率预测

- 的影响分析[J].内蒙古电力技术,2023,41(4):8-12.
- ZHENG Tingting, SHAN Xiaoyu, MA Jitao, et al. Impact of Cold Wave Weather on Wind Power Operation and Power Prediction[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2023, 41(4): 8-12.
- [11] 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.
- [12] 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.
- DONG Haiping, CHEN Yusheng, DONG Jianbing, et al. Research on the Restrictive Mechanism of Ice Cover Environment in Zhangjiachuan Wind Farm[J]. Wind Energy, 2020(6): 78-83.
- [13] 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.
- LI Qiang, LI Yan, FENG Fang, et al. Wind tunnel test on iced nose cone for small-scale horizontal axis wind turbine [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(6): 66-69.
- [14] 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.
- LI Luping, LIU Shenxian, TAN Haihui, et al. Experimental Study of the Influence of Air Temperature and Humidity on the Ice Covering Characteristics of a Blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(5): 610-614.
- [15] 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.
- [16] 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.
- XU Yang, CHEN Zhenghong. Forecasting method of wing turbine icing age in wing farm[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(6): 934-940.
- [17] 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.
- LI Zhongyi, YE Gengjiao, LU Xiaofeng, et al. Wind turbine ice prediction based on Makkonen icing growth model[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(10): 127-133.
- [18] 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.
- XIONG Changquan, HE Zeqi, ZHANG Yuning, et al. Short term icing state prediction model for wind turbine blades based on Bi LSTM and support vector machine[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2021, 44(3): 88-94.
- [19] 贾睿,杨国华,郑豪丰,等.基于自适应权重的CNN-LSTM&GRU组合风电功率预测方法[J].中国电力,2022,55(5):47-56.
- JIA Rui, YANG Guohua, ZHENG Haofeng, et al. CNN-LSTM&GRU combined wind power prediction method based on adaptive weights[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 47-56.
- [20] 梁涛,石欢,崔洁,等.基于Bagging神经网络集成的风功率预测[J].水电能源科学,2020,38(4):205-208.
- LIANG Tao, SHI Huan, CUI Jie, et al. Wind power prediction based on Bagging neural network ensemble[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(4): 205-208.
- [21] 牛哲文,余泽远,李波,等.基于深度门控循环单元神经网络的短期风功率预测模型[J].电力自动化设备,2018,38(5):36-42.
- NIU Zhewen, YU Zeyuan, LI Bo, et al. Short term wind power prediction model based on deep gated recurrent unit neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 36-42.
- [22] 申艳杰,尚兆晖.基于深度学习的多尺度风功率预测的研究[J].自动化应用,2023,64(7):87-90.
- SHEN Yanjie, SHANG Zhaohui. Study on Multi-Scale Wind Power Prediction Based on Depth Learning[J]. Automation Application, 2023, 64(7): 87-90.
- [23] 韩自奋,陈宁,范义,等.基于多种机器学习算法的风电功率预测融合模型[J].干旱气象,2024,42(5):710-718.
- HAN Zifen, CHEN Ning, FAN Yi, et al. Fusion model of wind power prediction based on multiple machine learning algorithms[J]. Journal of Arid Meteorology, 2024, 42(5): 710-718.
- [24] 宋江涛,崔双喜,刘洪广.基于二次分解NGO-VMD残差项与长短时记忆神经网络的超短期风功率预测[J].科学技术与工程,2023,23(6):2428-2437.
- SONG Jiangtao, CUI Shuangxi, LIU Hongguang. Ultra short term wind power prediction based on quadratic decomposition NGO-VMD residual term and long short-term memory neural network[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2428-2437.
- [25] 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.
- [26] 孟杭,黄细霞,刘娟,等.结合随机森林和SVM的风机叶片结冰预测[J].电测与仪表,2020,57(17):66-71.
- MENG Hang, HUANG Xixia, LIU Juan, et al. Forecast of fan blade icing combing with random forest and SVM[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(17): 66-71.
- [27] 叶林,李奕霖,裴铭,等.寒潮天气小样本条件下的短期风电功率组合预测[J].中国电机工程学报,2023,43(2):543-554.
- YE Lin, LI Yilin, PEI Ming, et al. Combined Approach for Short - term Wind Power Forecasting Under Cold Weather With Small Sample[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 543-554.
- [28] 全国气候与气候变化标准化技术委员会.电线积冰气象风险等级:QX/T 355—2016[S].北京:中国气象局,2017.
- [29] 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.
- YU Dongwei, SI Guangquan, KONG Xiangyi, et al. Icing mechanism and prediction analysis for wind turbine blades[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2021, 38(3): 327-336.
- [30] 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.
- ZHAO Bin, CHEN Hongbao, WANG Jiayuan. Study on meteorological hazard factors in wind power development in Gansu province[J]. Water Resources Planning and Design, 2020(4): 78-81.
- [31] Lower H. Aircraft icing handbook[M]. Wellington: New Zealand Civil Aviation Authority, 2000: 62-66.
- [32] 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.
- [33] 姚琳,徐卫民,彭王敏子,等.CALMET模式不同参数化方案对江西省山地风场模拟的对比分析[J].气象科技进展,2020,10(1): 58-64.
- YAO Lin, XU Weimin, PENG Wangminzi, et al. Effects of Parameterization Schemes in the CALMET Model on Numerical Simulation of Wind Speed at the Mountain Wind Power Station of Jiangxi Province[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(1): 58-64.
- [34] 蓝浩宸,卢炳夫,李仲怡,等.极端寒潮天气过程风机凝冰受限容量分析[J].南方能源建设,2025,12(2):26-35.
- LAN, Haochen, LU Bingfu, LI Zhongyi, et al. Analysis of the Limited Capacity of Wind Turbine Icing in Extreme Cold Wave Weather Process[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(2): 26-35.
- [35] 许杨,陈正洪.风电场风机覆冰期预报方法研究[J].气象科技, 2021,49(6):923-929.
- XU Yang, CHEN Zhenghong. Method for Forecasting Duration of Wind Turbine Icing in Wind Farms[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(6): 923-929.
- [36] 范强,肖书舟,张厚荣,等.基于WRF-Light GBM和微地形精细化天气预报的导线覆冰研究[J].电力大数据,2024,27(7):54-61.
- FAN Qiang, XIAO Shuzhou, ZHANG Hourong, et al. Research on Conductor Icing Based on WRF-Light GBM and Fine-Grained Weather Forecast of Microtopographic Conditions [J]. Power Systems and Big Data, 2024, 27(7): 54-61.
- [37] 韩斌,曾志祥,孔繁新,等.基于多层感知器神经网络的风机叶片覆冰预测模型研究[J/OL].发电技术,1-9[2025-01-17].http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.tk.20250121.1532.002.html.
- [38] 吴建蓉,何锦强,张敬黎,等.基于多源信息融合的架空输电线路覆冰预测模型研究[J].电力大数据,2023,26(4):56-64.
- WU Jianrong, HE Jinqiang, ZHANG Qili, et al. Icing Prediction Model Analysis for Overhead Transmission Lines Based on Multi-Source Information Fusion[J]. Power Systems and Big Data, 2023, 26(4): 56-64.
- [39] 董新胜,马树阳,王帅,等.输电线路覆冰脱冰跳跃抑制措施的仿真研究[J].电网与清洁能源,2024,40(10):24-30,39.
- DONG Xinsheng, MA Shuyang, WANG Shuai, et al. A Simulation Study on Ice Shedding Bouncing Suppression Measures for Transmission Lines[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 24-30, 39.
- [40] 党跃,任宇,董波.架空输电导线覆冰机理及相关预测模型现状与发展[J].云南电力技术,2023,51(1):6-12.
- DANG Yue, REN Yu, DONG Bo. Review of the Current Situation and Development of Icing Mechanism and Related Prediction Models of Overhead Transmission Wires[J]. Yunnan Electric Power, 2023, 51(1): 6-12.
- [41] 杨昌杏,李录平.风力机叶片损伤故障检测技术研究进展[J].发电技术,2020,41(6):599-607.
- YANG Changxing, LI Luping. Research Progress on Blade Damage Fault Detection Technology of Wind Turbine[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(6): 599-607.
- [42] 郑若楠.数据驱动的风电机组叶片结冰在线检测方法[J].分布式能源,2019,4(1):1-7.
- ZHENG Ruonan. On-Line Detection Method of Ice on Wind Turbine Blade Driven by Data[J]. Distributed Energy, 2019, 4(1): 1-7.
- [43] 陈雅芳.输电线路绝缘子覆冰预测及防护方法综述[J].山东电力技术,2023,50(3):48-56.
- CHEN Yafang. Review on Prediction and Protection Methods of Ice Coating on Insulators of Transmission Lines[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(3): 48-56.
- [44] 张毅,程正军,刘洋.输电线路覆冰在线监测研究进展与发展趋势[J].电力大数据,2024,27(6):32-42.
- ZHANG Yi, CHENG Zhengjun, LIU Yang. Research Progress and Development Trends on Online Icing - monitoring of Transmission Lines[J]. Power Systems and Big Data, 2024, 27(6): 32-42.

编辑:张俊英

[收稿日期] 2024-04-01;[修改日期] 2025-03-18

[作者简介] 陈正洪(1964),男,湖北人,硕士,正研级高级工程师,从事应用气象、气候变化方面研究工作。E-mail:chenzh64@126.com  
贺莉微(1988),女,陕西人,硕士,高级工程师,从事应用气象服务方面的工作。(通信作者)E-mail:616664366@qq.com