

# 基于 BP 神经网络和多因素权重分析的 气热除冰温度影响因素研究

许 扬<sup>1</sup>, 蔡安民<sup>1</sup>, 吴梓秋<sup>2</sup>, 林伟荣<sup>1</sup>, 张林伟<sup>1</sup>, 李水清<sup>2</sup>  
(1.中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209;  
2.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084)

[摘 要] 对典型叶片的气热除冰系统, 建立全尺寸三维换热模型, 对流固耦合传热过程进行模拟观察, 同时, 简化并构建一维换热模型, 探究了环境温度等关键参数对除冰气流温度的影响; 基于 BP 神经网络, 建立环境条件与最低除冰气流温度之间的对应关系。结果显示: 在叶片铺层结构与叶片流道布置的综合影响下, 叶片前缘中部处气热除冰难度最大; 利用 BP 神经网络可实现不同条件下的最低除冰气流温度的快速计算和预测; 多因素权重分析显示, 环境温度、PVC 材料导热系数是影响最低除冰气流温度的两大关键参数; 对于  $0.2r \sim r$  范围内的除冰, 叶片长度也是影响最低除冰气流温度的关键参数, 其影响权重达到 14.3%。

[关 键 词] 风力发电; 气热除冰; 传热优化; BP 神经网络

[中图分类号] TM85 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfed.202208162

[引用本文格式] 许扬, 蔡安民, 吴梓秋, 等. 基于 BP 神经网络和多因素权重分析的气热除冰温度影响因素研究[J]. 热力发电, 2022, 51(12): 131-140. XU Yang, CAI Anmin, WU Ziqiu, et al. Influencing factors of air thermal deicing temperature based on BP neural network and multi-factor weight analysis[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(12): 131-140.

## Influencing factors of air thermal deicing temperature based on BP neural network and multi-factor weight analysis

XU Yang<sup>1</sup>, CAI Anmin<sup>1</sup>, WU Ziqiu<sup>2</sup>, LIN Weirong<sup>1</sup>, ZHANG Linwei<sup>1</sup>, LI Shuiqing<sup>2</sup>

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

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A full-scale three-dimensional heat transfer model is established for a typical blade air thermal deicing system, and the convection of solid coupling heat transfer process is simulated and observed. At the same time, the one-dimensional heat transfer model is simplified and constructed, and the influence of key parameters such as ambient temperature on the temperature of deicing air flow is explored. On the basis of BP neural network, the corresponding relationship between the environmental conditions and the minimum deicing air flow temperature is established. The results show that, under the comprehensive influence of the blade layer structure and the blade channel arrangement, the air thermal deicing at the middle of the blade leading edge is the most difficult. With the help of BP neural network, the rapid calculation and prediction of the minimum deicing air flow temperature under different conditions can be realized. The multi-factor weight analysis shows that, the environmental temperature and the thermal conductivity of PVC material are the two key parameters affecting the minimum deicing air flow temperature. For deicing in the range of  $0.2r \sim r$ , the blade length is also a key parameter affecting the minimum deicing air flow temperature, with influence weight up to 14.3%.

**Key words:** wind power generation; air thermal deicing; heat transfer optimization; BP neural network

截至 2020 年底, 全国风电装机总容量达到 2.8 亿 kW, 并且在十四五期间, 仍将得到持续大力发展<sup>[1]</sup>。随之而来的是, 易凝冻地区风电场因叶片

覆冰导致的发电量损失。该情况在国外风电场也普遍存在, 美国能源部发布的极端寒冷和冬季天气第二号公告显示, 由于极寒天气导致得克萨斯州、路

收稿日期: 2022-08-05

基金项目: 中国华能集团清洁能源技术研究院科技项目 (TO-21-CERI01-TD-21); 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-H02)

Supported by: Science and Technology Project of Huaneng Clean Energy Technology Research Institute Co., Ltd. (TO-21-CERI01-TD-21); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-H02)

第一作者简介: 许扬 (1993), 女, 博士, 主要研究方向为风力发电、气固两相流, xuyang\_thu@163.com。

易斯安那州和俄克拉何马州大面积停电，其中一项重要原因便是风机叶片结冰限制了风力机出力。因此，研究易凝冻地区风电机组叶片防除冰技术，对提高风电机组利用率，提升机组安全性具有重要意义。

叶片结冰问题涉及流体力学、传热传质学和热力学等多个学科领域。自 1978 年，美国 NASA 的 Lewis 研究中心开始了世界首款覆冰程序的研究开发<sup>[2]</sup>，研究学者后续开展了大量的关于叶片结冰的数值模拟和实验研究等工作<sup>[3-10]</sup>。除了需要厘清叶片结冰的机理，更重要的是，在工程上需要具有应对结冰的措施。

现有的防冰、除冰技术可细分为主动型和被动型 2 种。主动型除冰技术主要包括化学溶液法<sup>[11]</sup>、机械法<sup>[12]</sup>、加热法<sup>[13]</sup>、主动变桨控制法<sup>[14]</sup>。被动型除冰技术主要包含疏水涂料、光热涂料和防结冰停机<sup>[15-18]</sup>。目前，已经市场化的技术主要是电阻加热除冰、气热除冰以及光热涂料，而其他技术则大多停留在样机测试和实验室阶段。根据 CNABS 和 DWPI 数据库检索结果<sup>[19]</sup>，目前针对风机叶片除冰的专利有 72% 来自于热力除冰，而其中又有 33% 的专利产生于气热除冰。舒立春等<sup>[5]</sup>根据风机叶片电加热防冰结构和流场特点，建立了叶片电加热防冰理论模型，并对临界防冰状态进行了仿真分析。杨博等<sup>[20]</sup>开展了风力机叶片气热除冰的传热计算与分析，分析计算了在给定空气加热器输出热量下的除冰时间。吕庆等<sup>[21]</sup>结合地面实验分析和有限元分析法对气热除冰系统的合理性进行了分析。罗玉平等<sup>[22]</sup>针对风电机组防除冰改造需求，探讨了 2 MW 机组叶片采用气热防除冰技术的系统设计，重点围绕单支叶片加热系统设计、供电电源选择以及结冰监测与控制系统架构展开。对于同样基于加热法的电阻加热除冰和气热除冰技术，电阻加热除冰最大的问题在于其安全性。由于涉及金属网的布置，要求对雷电进行较好的防护，否则极易引发火灾，带来不可挽回的损失。而与之相比较，气热除冰技术的安全性则较好，不会增加雷击的风险。但是，气热技术具有初始造价高、除冰能耗大等诸多缺点<sup>[23-24]</sup>。一般，为了保证气热除冰的有效性，工程上的气热除冰系统一般处于满功率运行状态，能耗较高<sup>[25]</sup>。因此，研究气热除冰过程中的传热优化设计，并在满足除冰条件的基础上，研究影响气热除冰温度的关键因素，根据不同的环境条件确定合适的除冰气流温度，对提升气热除冰系统的经济性具有重要意义。

本文对典型叶片的气热除冰系统，建立全尺寸三维换热模型，对流固耦合传热过程进行模拟观察；同时，简化并构建一维换热模型，探究了环境温度等关键参数对除冰气流温度的影响；借助于 BP 神经网络，建立各关键参数与最低除冰气流温度之间的对应关系，实现不同条件下的最低除冰气流温度的快速计算和预测。该结论可为降低气热除冰能耗，提升气热除冰效率提供方法和理论指导。

## 1 数值计算方法

### 1.1 叶片传热模型

本文以某 2 MW 机组 51.5 m 长的叶片为对象，对叶片结构及其内部空间建立全尺寸三维传热模型。图 1 为叶片三维模型的结构，除冰气流经导热管输送至距离叶根 1/5 叶片长度（约 10 m）处后由导热管进入叶片内部流道，气流在叶片内部流动同时与叶片发生热量交换，流至叶尖处后，绕过前缘隔板，反向流回叶根处，导热管内径设置为 20 cm。根据叶片的铺层信息，对沿叶片展向的叶片壳体参数进行设置。将铺层简化为 3 层，分别为外层玻璃纤维布铺层、PVC 材料铺层、内层玻璃纤维布铺层。PVC 铺层、玻璃纤维布铺层的导热系数取值分别为 0.14、0.51 W/(m·K)。各段 PVC 材料的厚度如图 2 所示（ $l$  为距叶根长度， $r$  为叶片总长度）。

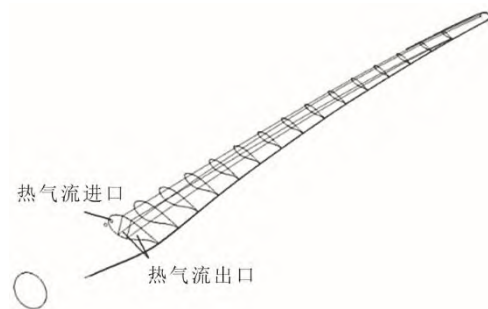


图 1 叶片三维模型结构

Fig.1 Structural diagram of the three-dimensional blade model

模拟过程中，为了对叶片实际转动过程进行模拟，将叶片沿展向等距离划分为 20 个区间，不同区间外部与空气的相对速度可表示为  $v_r = \omega l$ 。其中， $\omega$  为叶轮转动角速度， $l$  为某区间中点距离叶轮中心的距离。通过设置不同的外部换热边界条件以达到模拟叶片转动过程的目的。对三维模型进行网格划分，总网格单元数为 552 079。

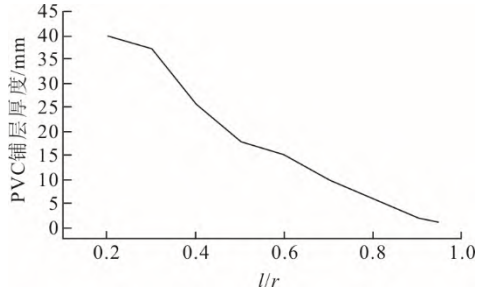


图 2 叶片展向 PVC 层厚度  
Fig.2 Thickness of PVC layer along blade spanwise

1.2 一维叶片传热模型

三维模型能够较准确地反映叶片实际的物理特性，但计算量大，变工况的适应性差。已有的调研及实际工程运行结果显示，风机叶片结冰区域主要发生在叶片前缘，并且靠近叶尖位置处的覆冰对叶片气动出力影响较大。因此，重点沿叶片展向前缘进行一维建模，即仅考虑温度沿着叶片前缘厚度（内部玻璃纤维导热层-PVC 导热层-外部玻璃纤维导热层）方向上的变化。一维叶片模型如图 3 所示。将叶片以  $0.05r$  为单位进行展向模块划分（ $r$  为叶片总长度）。近似认为在每个区间内，叶片壳体的物理组成相同。给定除冰热气流参数，对每个截面

分别进行求解，可获得每个区间的叶片内壁和外壁温度。

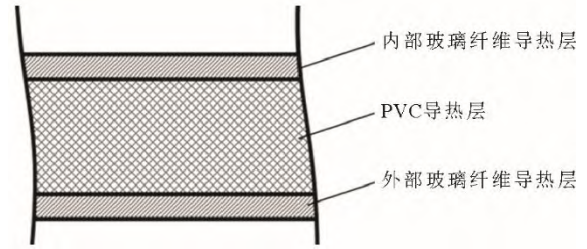


图 3 一维叶片模型  
Fig.3 Schematic diagram of the one-dimensional blade model

1.3 边界条件

在进行气热除冰的过程中，叶片内表面与除冰气流的换热，叶片内部的导热，叶片外表面与外界空气气流的换热分别表示如下。

1) 叶片内表面换热

$$q_i = h_i(T_g - T_b) \tag{1}$$

$$h_i = \frac{Nu \times \lambda_g}{l} \tag{2}$$

$Nu$  数采用内部气流修正后的管内湍流换热公式：

$$Nu = \frac{(Re - 1000)}{8(1.82 \times \ln(Re) - 1.64)^2} \frac{Pr(1 + (\frac{U}{x})^{\frac{2}{3}})(\frac{T_f}{T_b})^{0.45}}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{Pr^{\frac{2}{3}} - 1}{8(1.82 \times \ln(Re) - 1.64)^2}}} \tag{3}$$

式中： $q_i$ 、 $h_i$  分别为除冰热气流与叶片内壁之间进行换热的热流密度和对流换热系数； $T_g$  为除冰热气流的温度； $T_b$  为叶片内壁温度； $\lambda_g$  为除冰气流导热系数； $l$  为内部换热的特征长度； $Re$  为内部气流雷诺数； $Pr$  为内部气流普朗特数； $D$  为等效管径； $T_f$  为除冰热气流温度。

$$q_w = \alpha_1 w U_{rel} c_w (T_o - T_a) \tag{7}$$

根据能量守恒方程，得到下式：

$$\frac{Q_c}{dt} = q_o - q_r - q_h - q_w \tag{8}$$

式中： $q_o$  为叶片外表面受到的加热热流密度； $q_h$ 、 $q_r$  分别为叶片外表面与周围环境之间发生的对流、辐射换热； $q_w$  为加热叶片表面捕获水滴的热量； $h_o$  为叶片外表面与外部气流的换热系数； $T_o$  为叶片的外表面温度； $T_a$  为环境温度； $\epsilon$  为叶片表面辐射率； $\alpha_1$  为叶片表面的水滴捕集系数； $w$  为空气湿度， $g/m^3$ ； $U_{rel}$  为叶片与外部气流的相对速度； $c_w$  为水的比热容； $Q_c$  为叶片表面蓄热吸收的热量。

2) 叶片内部导热

$$q_m = -\lambda \frac{dT}{dx} \tag{4}$$

式中： $\lambda$  为叶片铺层的导热系数； $\frac{dT}{dx}$  为沿叶片厚度方向导热材料内部温度梯度。

3) 叶片外表面换热

叶片表面对外界的热交换包括对流换热、辐射换热、加热收集水滴等部分。这些热量分别由下面的公式给出：

$$q_h = h_o(T_o - T_a) \tag{5}$$

$$q_r = \epsilon \sigma (T_o + 273.15)^4 - (T_a + 273.15)^4 \tag{6}$$

当叶片内外表面传热达到稳态时， $\frac{Q_c}{dt} = 0$ ，

$$q_o = q_m = q_i$$

1.4 最低除冰气流温度判定方法

由于叶片内的除冰气流流动方向恒定，叶片前缘处气流由叶根流向叶尖，某位置处的气流温度由

该位置上游的传热特性决定。导热管出口气流温度应能满足任何截面处的除冰气流温度均高于等于其临界结冰温度。为了确认使得各截面均达到临界除冰点时气热除冰加热器出口的除冰气流温度,采取反向推演的算法,以 $0.05r$ 叶片区间为计算单元,以较远端 $0.95r$ 为计算起点,反推加热器出口除冰气流温度。以 $0.85r\sim 0.90r$ 区间的叶片单元为例,以 $0.90r$ 截面处的最低除冰气流温度为计算起点,该截面所需的最小除冰热流密度为 $q_{j,c,18}$ ,该区间的出口对应的临界除冰气流温度为 $t_{o,18}=T_{g,min,18}$ ,该区间内参与换热的叶片表面积为 $A_{18}$ ,该区间内热气流的平均比热容为 $c_{18}$ ,除冰气流的质量流率为 $\dot{m}$ 。根据能量守恒, $c_{18}\dot{m}(t_{in,18}-t_{o,18})=q_{j,c,18}A_{18}$ ,反推得到为了满足出口处除冰气流温度的该区间入口气流温度 $t_{in,18}$ 。此时,若 $t_{in,18}\geq T_{g,min,17}$ ,则以 $t_{in,18}$ 作为前一区间 $0.80r\sim 0.85r$ 区间出口的最低除冰气流温度,即 $t_{o,17}=t_{in,18}$ ;否则以 $T_{g,min,17}$ 作为 $0.80r\sim 0.85r$ 区间出口的最低除冰气流温度,即 $t_{o,i-1}=\max[t_{in,i}, T_{g,min,i-1}]$ 。以此类推,以区间为单位,反推至导热管出口所需最低的除冰气流温度,此即为特定工况下满足导热管出口至叶尖位置每个截面处除冰条件的最低除冰气流温度。

## 2 BP神经网络建立

从式(1)~式(8)可见,气热除冰所需的气流温度与环境温度、环境湿度、风速、风轮转速、临界结冰温度、除冰气流流量、叶片长度等多个参数相关。单一参数的变化会影响所需要除冰气流温度的变化。因此,为了实现不同环境条件下叶片除冰工况气流温度的快速预测,训练针对气热除冰气流温度的神经网络,实现多变量与最低除冰气流温度之间的直接映射关系。

图4为利用BP神经网络进行气热除冰所需最低气流温度预测的拓扑结构。在本文中,神经网络的输入变量为环境温度、环境湿度、风速、风轮转速、临界结冰温度、叶片壳体材料的导热系数、叶片长度等,而通过神经网络的计算,映射到的输出变量为达到除冰条件的最低入口气流温度。为了进一步对比叶片不同位置处达到除冰临界条件时所需的气流温度,在计算中分别计算 $0.2r\sim r$ 、 $0.5r\sim r$ 、 $0.8r\sim r$ 区间达到除冰所需要的气流温度。

具体关于神经网络的介绍以及其在风力发电领域的应用可以参见文献[26-28]。对于本文建立的

神经网络模型,隐含层传递函数选用Sigmoid函数,该函数及其导数均为连续函数,是进行神经网络计算的首选激活函数;输出层则采用线性传递函数。

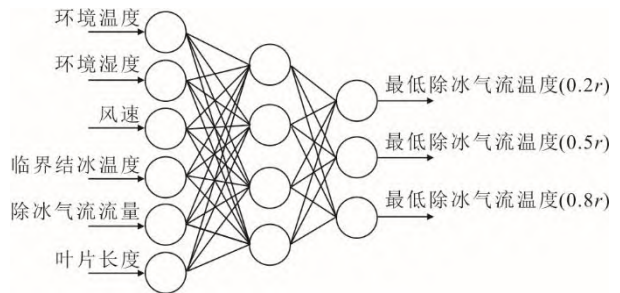


图4 利用BP神经网络预测气热除冰所需最低气流温度的拓扑结构

Fig.4 Topology of the lowest temperature required for de-icing using BP neural network

## 3 结果及讨论

### 3.1 一维模型和三维模型计算结果比较

外界环境温度为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风速为 $10\text{ m/s}$ ,风轮转速为 $17.6\text{ r/min}$ ,入口除冰气流温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,入口热气流速度为 $10\text{ m/s}$ 时,通过三维模型进行模拟得到的叶片内部和外部温度分布如图5所示。

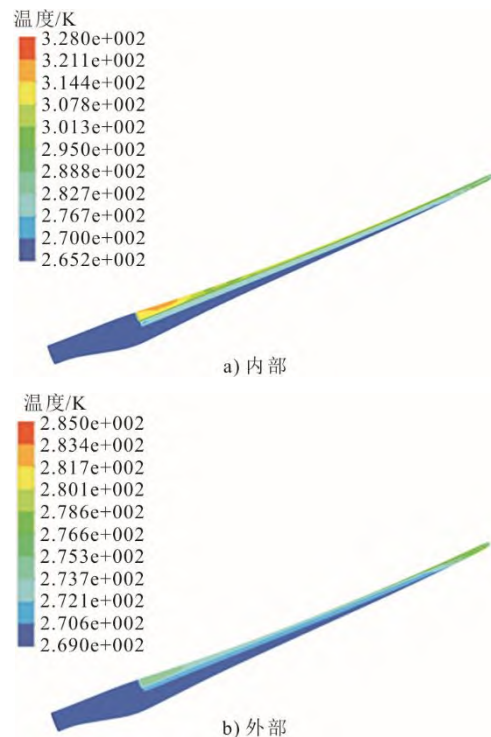


图5 三维模型模拟得到的叶片内部和外部温度分布  
Fig.5 The internal and external temperature distribution on the blade simulated by the three-dimensional model

从图5可以看出,叶片内部沿展向和弦长方向的温度分布不均匀。总体来说,鉴于换热气流的流

动方向，叶片内壁的温度由叶根向叶尖逐步降低；但是，在除冰气流离开导热管进入叶片内腔的出口附近，由于流动未充分发展，形成了局部回流，因此，在距离叶根 10~20 m 区间内形成了局部的温度高点。对于叶片外表面的温度，在靠近叶根和叶尖的位置温度比较高，叶片中间区域的温度则比较低。

图 6 给出了三维模型计算中前缘位置的内外表面温度在展向方向上的变化趋势。由图 6 可见，在该工况下，当入口气流温度为 55 °C 时，叶片表面的最低温度为 -0.14 °C，发生在距离叶根约 20 m 的位置。其主要原因在于：在导热管出口附近（距叶根 10 m 左右位置）虽然 PVC 材料层较厚，但内部除冰气流温度较高，因此其外表面温度较高；而当接近叶片尾端，叶片内部气流流道收缩，流速加快，除冰气流与叶片内部换热加强，所以尽管越靠近叶尖除冰气流温度越低，但由于传热加强，叶片外表面仍然可以保持在较高水平；而在叶片中段，叶片铺层较厚，流道较宽，除冰气流温度适中的情况下，叶片表面出现了温度的最低点。

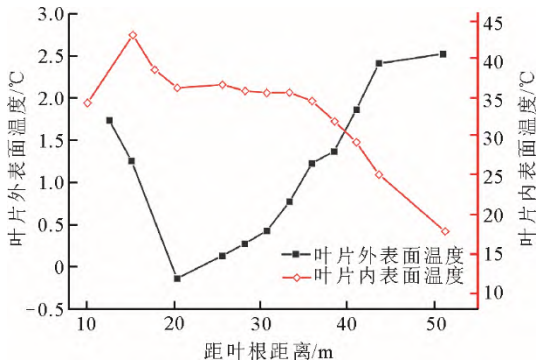


图 6 特定工况下叶片外表面和内表面温度分布  
Fig.6 The temperature distribution on outer and inner surfaces of the blades under specific working conditions

对比同样边界条件下，一维模型和三维模型计算结果，图 7 给出了该工况下三维模型和一维模型计算的沿叶片展向不同位置的叶片前缘处温度。从图 7 可以看出，虽然一维模型不能较三维模型完整反映叶片全尺度的温度分布，但是在覆冰的关键位置，即沿叶片前缘位置处，其对叶片外表面温度预测的准确度与三维模型较为一致。因此，利用一维模型进行快速计算，可以作为简化计算的重要方法。后续，将基于一维模型进行相关单变量影响的计算与分析。

### 3.2 基于一维传热模型的单变量影响分析

构成叶片的关键材料 PVC 在温度超过 75 °C 时易发生老化、强度降低等特性，因此为了保障叶片的

安全运行，必须控制除冰气流温度在 75 °C 以下，这也会对气热除冰的适用范围带来一定程度的限制。

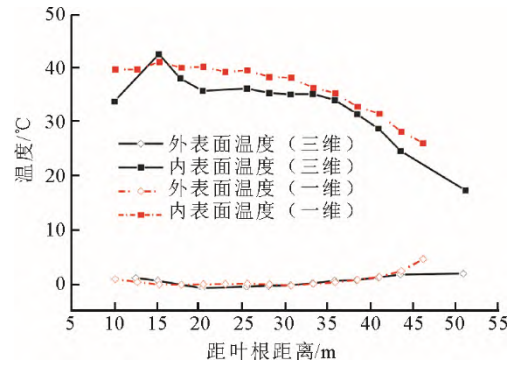


图 7 一维和三维模型计算叶片表面温度结果对比  
Fig.7 The blade surface temperature calculated by one-dimensional and three-dimensional models

本文选取的标准工况为：外界空气温度 -4 °C，空气湿度恒定 0.4 g/m<sup>3</sup>，风速 10 m/s，临界结冰温度 0 °C，导热管出口气流速度 10 m/s，叶片长度 51.5 m，PVC 材料的导热系数 0.14 W/(m·K)。在该标准工况的基础上进行单变量影响的研究，即在维持其余参数与标准工况一致时，仅改变单一变量，探究其对除冰加热气流温度的影响。考虑到气流导热管出口所对应的不同位置，本文分别计算满足 0.2r~r 区间、0.5r~r 区间、0.8r~r 区间内除冰所需要的最低入口除冰气流温度。

图 8 给出了在其他条件不变的情况下，0.2r~r、0.5r~r、0.8r~r 区间所对应的最低除冰气流温度随环境温度变化。

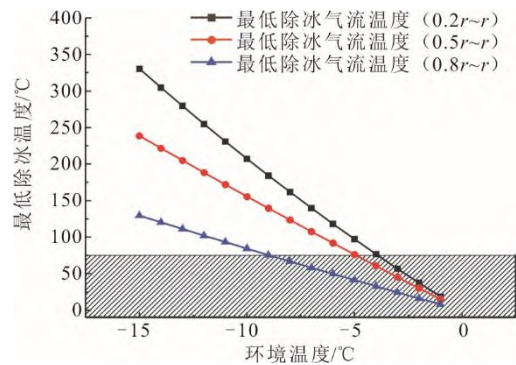


图 8 最低除冰气流温度随环境温度变化  
Fig.8 Variations of the minimum deicing air flow temperature with ambient temperature

由图 8 可以看出：环境温度越低，所需的除冰气流越高；同时，除冰的范围越大（比如从 0.8r~r 区间扩大到 0.2r~r 区间），所需要的除冰气流温度大幅增加。以除冰气流不得高于 75 °C 为边界条件，当 0.8r~r 区间均达到不覆冰的条件时，气热除冰适

用的最低环境温度为 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，一旦环境温度低于 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，为了实现该区间范围的除冰，所需要的除冰气流温度将超出叶片材料的安全阈值，产生安全隐患。同样，对于 $0.5r\sim r$ 、 $0.2r\sim r$ 区间内的除冰，气热除冰适用的最低环境温度分别为 $-5$ 、 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 9 给出了最低除冰气流温度随环境湿度的变化。由图 9 可见，随着空气湿度的提升，相同条件下所需要的除冰气流温度相应升高。这主要是由于湿度增加，叶片旋转时，附着在叶片表面的水滴增加，加热这部分叶片捕获水滴所需要的热量也随之增加。叶片除冰区域的增加，同样提高了对最低除冰气流温度的要求。在 $0.8r\sim r$ 区间，当空气湿度在 $0.2\sim 2.0\text{ g/m}^3$ 间波动时，为满足区间的除冰所需的热气流温度为 $31.4\sim 43.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；对于 $0.5r\sim r$ 区间，当空气湿度超过 $1.6\text{ g/m}^3$ 时，除冰所需要的热气流温度则超过叶片安全极限；而对于 $0.2r\sim r$ 区间，当湿度大于 $0.4\text{ g/m}^3$ 时，所需要的除冰气流温度则已经超出叶片安全极限。

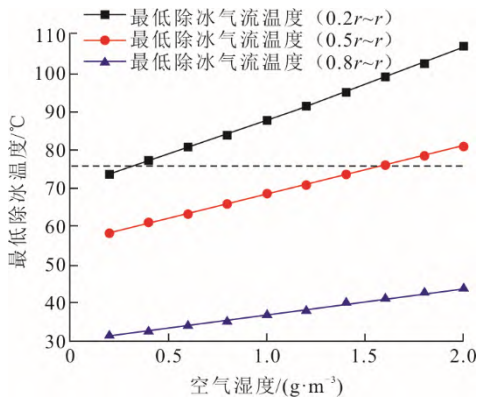


图 9 最低除冰气流温度随环境湿度变化  
Fig.9 Variations of the minimum deicing air flow temperature with ambient humidity

由于风速与风轮转速之间存在一一映射关系，针对本文选定的 2 MW 机组，风轮转速  $f$  与风速  $v$  的关系为：

$$f = \begin{cases} 0, & v < 3 \text{ m/s} \\ 10, & 3 \text{ m/s} \leq v \leq 5 \text{ m/s} \\ 10 + 2.5 \times (v - 5), & 5 \text{ m/s} < v \leq 8 \text{ m/s} \\ 17.6, & 8 \text{ m/s} < v \leq 23 \text{ m/s} \\ 0, & v > 23 \text{ m/s} \end{cases} \quad (9)$$

因此，仅通过对风速这一变量的探究来观察风速及风轮转速变化的影响。图 10 给出了在其他条件不变的情况下， $0.2r$ 、 $0.5r$ 、 $0.8r$  处所对应的最低除冰气流温度随外界风速的变化。从图 10 可以看出，不同风速下的除冰气流温度变化跟风速和该风

速下风轮转速的变化密切相关。风速越大，风轮转速越大时，叶片与外界气流间的相对速度增加，由对流换热主导的叶片外表面散热增加，用于除冰的加热气流温度随之升高。同时，当风速超出机组的切出风速（ $23\text{ m/s}$ ）时，机组在控制系统的作用下处于停机状态，此时风轮转速为 0，叶片与外界空气之间的对流换热较运行时明显下降，因此，所需要的除冰热气流温度明显下降。此外，在该条件下，当风速超过  $10\text{ m/s}$  并且低于切出风速时，在叶片安全范围内，无法满足  $0.2r$  处的除冰要求。

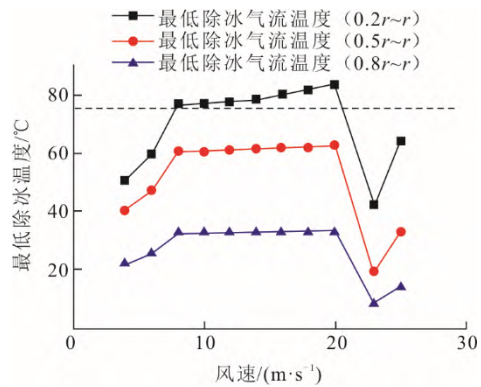


图 10 最低除冰气流温度随外界风速变化  
Fig.10 Variations of the minimum deicing air flow temperature with external wind speed

图 11 给出了  $0.2r\sim r$ 、 $0.5r\sim r$ 、 $0.8r\sim r$  区间所对应的最低除冰气流温度随临界结冰温度变化。此处的临界结冰温度是指为了满足表面不结冰的条件，叶片表面所需要达到的最低温度。临界结冰温度与外界环境条件、叶片表面特性、风机运行状态等均有关系，但本文不对覆冰过程进行详细研究，仅研究当临界结冰温度发生变化时，所对应的除冰气流温度发生的变化。

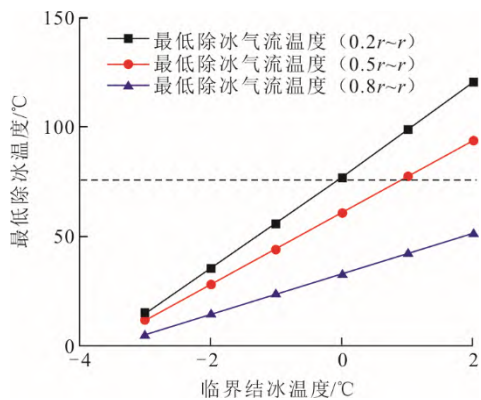


图 11 最低除冰气流温度随临界结冰温度变化  
Fig.11 Variations of the minimum deicing air flow temperature with critical icing temperature

由图 11 可以看出，临界结冰温度越高，将叶片

表面加热至该温度所需要的热量越高，对应除冰气流的温度相应提升。当临界结冰温度大于 0 °C 时，为满足 0.2r~r 区间内的除冰，所需要的除冰气流温度将高于 75 °C；而当临界结冰温度大于 1 °C 时，为满足 0.5r~r 区间的除冰，所需要的除冰气流温度也将高于 75 °C；当临界结冰温度处于-3~2 °C 之间时，气热除冰均能满足 0.8r~r 区间的除冰需求，所需要的除冰气流温度最高仅为 51.7 °C。

图 12 给出了除冰加热气流温度随导热管出口气流速度（即除冰气流流量）变化。随着出口气流流速的提升，叶片内腔热气流流速的升高，增强了热风与叶片内表面间的对流换热效果，所需除冰气流温度明显降低。但是随着流量的进一步提升，除冰热气流温度降低幅度逐渐变缓，可见此时继续增加除冰气流流量并不能有效优化除冰系统的传热效果，相反会增加除冰能耗。可是，降低除冰气流流量可能会使得所需除冰气流温度超出叶片的安全极限，因此，在选择除冰气流温度和流量时，要综合考虑经济性和安全性。

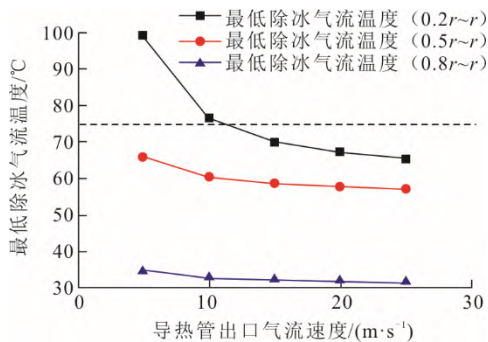


图 12 最低除冰气流温度随导热管出口气流速度变化  
Fig.12 Variations of the minimum deicing air flow temperature with air flow velocity at outlet of the heat transfer tube

图 13 给出了除冰加热气流温度随叶片长度的变化。为了简化问题，当研究叶片长度变化的影响时，认为每个区间叶片的铺层材料、厚度等物理性质均与本文中 51.5 m 长叶片的物理性质相同，仅区间长度发生变化。由图 13 可见，除冰气流温度随着叶片长度的增加近似呈现线性升高的趋势，且对于长度大于 60 m 的叶片，满足叶片尖端 0.8r~r 区间的除冰，气热除冰均可以实现。但要使得 0.2r~r 区间均达到临界结冰温度以上，其所需要的除冰热气流温度已高于叶片的安全温度极限，故单纯使用气热除冰难以满足。

图 14 给出了除冰加热气流温度随 PVC 材料导

热系数的变化。相比较于表面的玻璃纤维铺层，PVC 材料的导热系数仅约为玻璃纤维铺层的 1/5，并且 PVC 铺层的厚度远远大于玻璃纤维铺层，因此其在热传导过程中起着关键性的决定作用。由图 14 可见：随着 PVC 材料导热系数的提升，所需要的除冰热气流温度明显下降；但是，当 PVC 材料的导热系数与玻璃纤维材料的导热系数相近，甚至超过玻璃纤维材料的导热系数之后，除冰气流温度下降的趋势变缓。这主要是由于，此时导热系数较低的玻璃纤维材料成为制约热传导效率的主要因素。因此，优化气热除冰的另一有效措施则是从叶片本体着手，提升叶片材料的导热系数，提高除冰传热效率，节省除冰能耗。

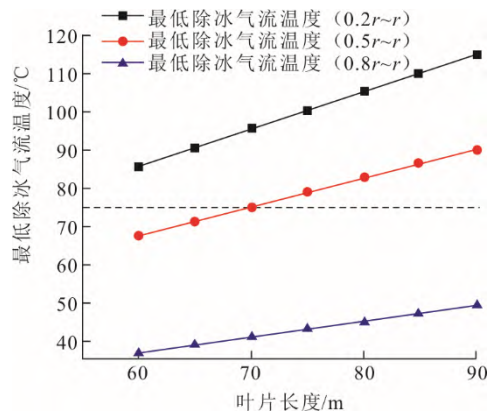


图 13 最低除冰加热气流温度随叶片长度的变化  
Fig.13 Variations of the minimum deicing heating air flow temperature with blade length

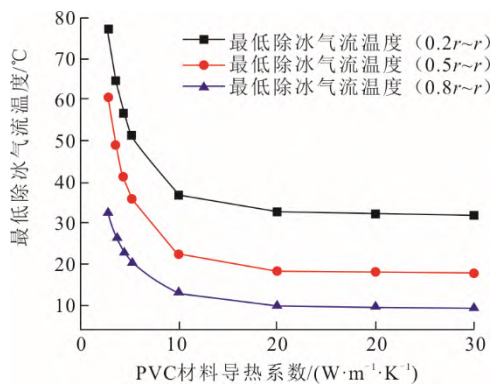


图 14 除冰加热气流温度随 PVC 材料导热系数变化  
Fig.14 Variations of the deicing heating air temperature with thermal conductivity of PVC material

### 3.3 BP 神经网络计算结果

上述分别对气热除冰所需要的最低气流温度进行了讨论，并给出了在不同工况下气热除冰应用的边界。对于本文选用的 110 个风况数据集，设定其中 90% 的工况为训练集，10% 为测试集。为了避免不同变量数值大小差异对训练精度产生影响，

在训练前首先对测试集、训练集的输入、输出均进行线性归一化处理。神经网络的训练次数设置为 1 000，学习速率设为 0.01，训练目标设置为 0.001，动量因子设置为 0.9。综合考虑均方误差以及多重判定系数  $R$ ，对  $0.2r$ 、 $0.5r$ 、 $0.8r$  处，最终选取各自的神经网络节点数分别为 7、3、3。对于本文选用的

110 个风况数据集进行神经网络的训练，以获得快速得到特定工况下最低除冰气流温度的映射关系。

以满足  $0.2r \sim r$  处除冰所需要的除冰气流温度为 例，除冰气流温度与各变量之间的映射关系所对应的神经网络输入隐含层权值矩阵以及输出隐含层权值矩阵分别见表 1、表 2。

表 1 BP 神经网络输入隐含层权值矩阵  
Tab.1 The weight matrix of input-hidden layer of BP neural network

输入变量	隐含层节点数						
	1	2	3	4	5	6	7
导热管出口气流流速	-0.057	0.302	-1.345	-0.196	-0.661	-0.972	0.395
空气湿度	-0.488	-0.565	-0.235	0.429	-0.929	-0.290	-1.021
风速	0.859	0.140	-0.239	0.328	-0.185	0.726	-1.124
风轮转速	-1.252	0.161	-0.538	-1.081	-0.453	-0.535	-0.506
临界结冰温度	0.602	0.078	0.061	-1.105	-0.477	0.935	0.494
环境温度	-0.517	0.479	-1.109	1.551	-0.453	0.613	-0.647
PVC 材料导热系数	0.054	1.693	0.295	0.089	0.064	0.190	0.343
叶片长度	0.558	-0.180	1.135	-0.947	1.493	-0.359	-0.151

表 2 神经网络输出隐含层权值矩阵  
Tab.2 The weight matrix of output-hidden layer of BP neural network

隐含层节点数	1	2	3	4	5	6	7
输出	-0.148	-0.974	0.366	-0.217	-0.423	0.044	-0.346

在该参数设置下，该神经网络对训练数据集多重判定系数  $R$  达到 0.996 47，所有数据集训练的多重判定系数  $R$  达到 0.975 26（图 15）。

同样地，对于  $0.5r$ 、 $0.8r$  处，基于数据集对相应的神经网络进行训练，也相应获得其对应的映射关系，训练数据集多重判定系数  $R$  分别达到 0.996 57 和 0.996 60。因此，借助于 BP 神经网络，建立了环境因素、叶片结构等特征参数与叶片气热除冰气流之间的映射关系，实现了气热除冰所需热气流温度的快速判断。

### 3.4 多因素权重分析

为了进一步分析不同因素对叶片除冰所需要的最低除冰气流温度影响权重，在训练得到的神经网络的基础上，提取网络特征参数，包括从输入层到隐含层的权重矩阵，从隐含层到输出层的权重矩阵，以及所有层的偏置矩阵。基于 Garson 算法，分析不同输入变量对输出变量影响的权重<sup>[25]</sup>。Garson 算法表示为：

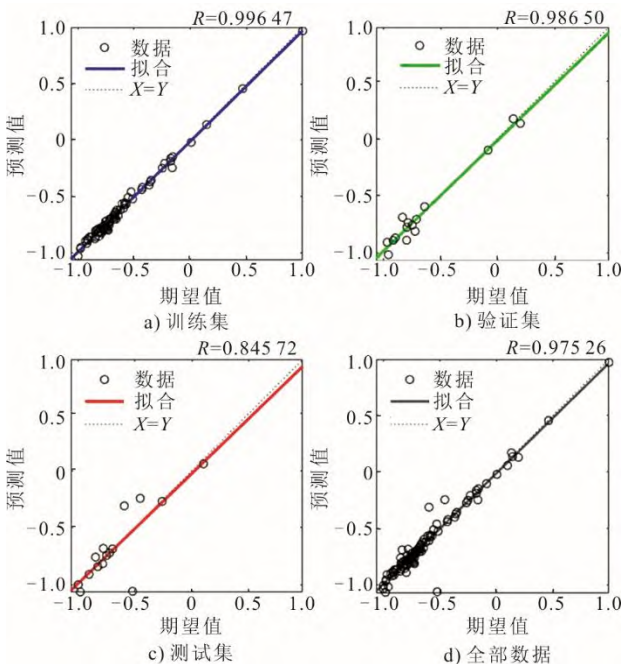


图 15 BP 神经网络对  $0.2r$  处最低除冰气流温度的预测结果  
Fig.15 Prediction results of the BP neural network for the lowest deicing air flow temperature at  $0.2r$

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \left( \frac{W_{j,i}^1}{\sum_{i=1}^{i=p} |W_{j,i}^1|} \right) \cdot |W_{1,j}^2|}{\sum_{i=1}^{i=p} \sum_{j=1}^{j=n} \left( \frac{W_{j,i}^1}{\sum_{i=1}^{i=p} |W_{j,i}^1|} \right) \cdot |W_{1,j}^2|} \quad (10)$$

式中： $p$  为输入层单元数； $n$  为隐含层的神经元个



数;  $I_i$  为第  $i$  个因素的影响权重;  $W_{j,i,1}$  为从输入层第  $i$  个神经元到隐含层第  $j$  个神经元的权重;  $W_{i,j,2}$  为从隐含层第  $j$  个神经元到输出层的权重。

对  $0.2r$ 、 $0.5r$ 、 $0.8r$  处的最低除冰气流温度进行 Garson 多因素权重分析, 分析结果如图 16 所示。分析结果显示, 总体来看, 环境温度、PVC 材料导热系数是影响最低除冰气流温度的两大关键参数。除冰区间越短, PVC 材料导热系数的决定性作用越明显。如仅针对叶片尖端进行除冰时, PVC 材料导热系数对最低除冰气流温度的影响权重达到 39.6%; 而对于  $0.2r \sim r$  区间内的除冰, PVC 材料导热系数的影响权重仅有 13.0%。对于  $0.2r \sim r$  范围内的除冰, 叶片长度也是影响最低除冰气流温度的关键参数, 其影响权重达到 14.3%。

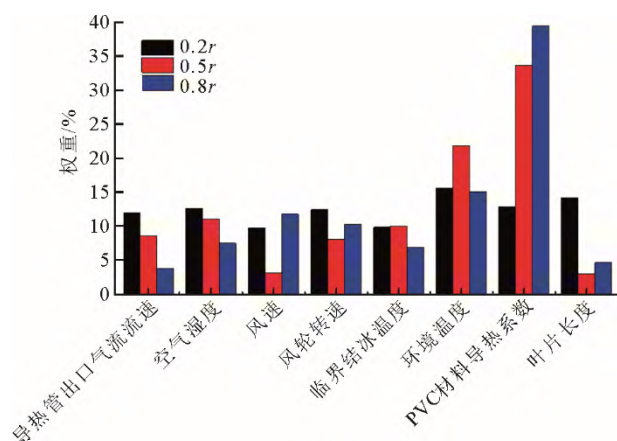


图 16 不同参数对最低除冰气流温度的影响权重

Fig.16 The influence weights of different parameters on the lowest deicing air flow temperature

## 4 结 论

本文基于典型叶片的气热除冰系统, 建立三维和一维换热模型, 对气热传热过程进行模拟及优化设计。基于一维模型, 着重讨论了环境温度、风速、空气湿度、风轮转速、临界结冰温度、材料导热系数、叶片长度等关键参数对最低除冰气流的影响。借助于 BP 神经网络, 建立环境条件与最低除冰气流温度之间的对应关系, 实现不同条件下最低除冰气流温度的快速计算和预测。本文工作可为快速确定气热除冰气流参数, 降低气热除冰能耗, 提升气热除冰效率提供方法和理论指导。

1) 三维全尺寸模型和一维简化模型均能较为准确地反映叶片气热除冰过程中叶片内、外表面温度的变化。在覆冰的关键位置, 如沿叶片前缘处, 一维模型不仅具有较好的预测准确度, 同时具有较

快的计算速度, 可用于最低除冰气流温度的快速简化计算。

2) 为了保证叶片材料的安全性, 气热除冰存在应用的边界。气热除冰的应用边界与环境温度、环境湿度以及叶片结构、除冰气流参数等紧密相关。

3) 通过 BP 神经网络的应用, 构建了环境因素、叶片结构等特征参数与叶片气热除冰气流之间的映射关系, 实现气热除冰所需热气流温度的快速判断。

4) 多因素权重分析结果显示, 环境温度、PVC 材料导热系数是影响最低除冰气流温度的两大关键参数。除冰区间越短, PVC 材料导热系数的决定性作用越明显。对于  $0.2r \sim r$  范围内的除冰, 环境温度、PVC 材料导热系数、叶片长度是影响最低除冰气流温度的最主要的 3 个因素。

## [参 考 文 献]

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴: 2020 年[Z/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook: 2020[Z/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.
- [2] WILLIAM W. User's manual for LEWICE Version 3.2[R]. NASA Technical Report, 2008, No.CR-2008-21425: 1.
- [3] KRENN A, VEREIN E, JORDAENS P J, et al. Available technologies for wind energy in cold climates[R]. IEA Wind Task 19 Technical Report, 2016: 15.
- [4] 王绍龙. 水平轴风力机叶片结冰分布数值模拟与冰风洞试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017: 1. WANG Shaolong. Numerical simulation and icing wind tunnel test study on icing distribution on blade of horizontal axis wind[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017: 1.
- [5] 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 Lichun, REN Xiaokai, HU Qin, et al. Influences of environmental parameters on icing characteristics and output power of small wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5873-5878.
- [6] 李晓峰, 常士楠, 冷梦尧, 等. 冰风洞内水滴参数沿程变化的数值模拟[J]. 计算机仿真, 2018, 35(10): 66-71. LI Xiaofeng, CHANG Shinan, LENG Mengyao, et al. Numerical simulation of water droplet parameters variation along the icing wind tunnel[J]. Computer Simulation, 2018, 35(10): 66-71.
- [7] 张旋. 过冷水滴的结冰与碰撞及其耦合特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2019: 1. ZHANG Xuan. Research on freezing and impact processes of supercooled water droplet and their coupling characteristics[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019: 1.
- [8] 潘永祥. 水平轴风力机叶片结冰对其动力学特性影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020: 1. PAN Yongxiang. Research on the effect of ice accretion on blade's dynamic characteristics for horizontal axis wind turbine[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020: 1.

- [9] 申晓斌, 郭琦, 林贵平, 等. 三维旋转部件复杂表面结冰数值模拟[J]. 飞机设计, 2020, 40(5): 41-47.  
SHEN Xiaobin, GUO Qi, LIN Guiping, et al. Simulation of ice accretion on complex surface of rotating component[J]. Aircraft Design, 2020, 40(5): 41-47.
- [10] 吴光军, 孙志禹, 朱亚伟, 等. 风电机组叶片防覆冰技术研究分析[J]. 风能技术, 2016(9): 62-64.  
WU Guangjun, SUN Zhiyu, ZHU Yawei, et al. Research and analysis of anti-icing technology for wind turbine blades[J]. Wind Energy, 2016(9): 62-64.
- [11] 阎映弟. 新型超疏水涂层的微纳结构设计及其表面防覆冰作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 1.  
YAN Yingdi. The micro-nano structure design of novel superhydrophobic coatings and their anti-icing & icephobic properties[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 1.
- [12] 韩龙伸. 超声波除冰方法与试验研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013: 1.  
HAN Longshen. Research on ultrasonic deicing methods and its experiment[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013: 1.
- [13] ANSHELM J, SIMON H. Power production and environmental opinions: environmentally motivated resistance to wind power in Sweden[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 1524-1555.
- [14] 郑进, 张庆华, 罗振寰, 等. 风电叶片防护涂层材料的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 11: 182-186.  
ZHENG Jin, ZHANG Qinghua, LUO Zhenhuan, et al. Progress on the protective coating layer materials of wind turbine blades[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 11: 182-186.
- [15] ARIANPOUR F, FARZANEH M, KULINICH S A, et al. Hydrophobic and ice-retarding properties of doped silicone rubber coatings[J]. Applied Surface Science, 2013, 265: 546-552.
- [16] KIMURAS S T, KOSUGI K. The effect of anti-icing paint on the adhesion force of ice accretion on a wind[C]. Turbine Blade BOREAS VI. FMI, Pyhätunturi, 2003.
- [17] PENG C Y, XING S L, YUAN Z Q, et al. Preparation and anti-icing of superhydrophobic PVDF coating on a wind turbine blade[J]. Applied Surface Science, 2012, 259: 764-768.
- [18] MENINI R, GHALMI Z, FARZANEH M. Highly resistant icephobic coatings on alloys[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(1): 65-69.
- [19] 陈友庆, 杜美堂. 风电叶片除冰专利分析[J]. 中国科技信息, 2019, 13: 15-16.  
CHEN Youqing, DU Meitang. Patent analysis of wind power blade de-icing technology[J]. China Science and Technology Information, 2019, 13: 15-16.
- [20] 杨博, 宁立伟, 魏克湘, 等. 基于气热法风力机叶片除冰传热分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(4): 68-73.  
YANG Bo, NING Liwei, WEI Kexiang, et al. Heat transfer analysis of the de-icing system for wind turbine blades based on gas thermal[J]. Composites Science and Engineering, 2018(4): 68-73.
- [21] 吕庆, 宁立伟, 颜熹, 等. 基于气热法对风机叶片防冰除冰分析研究[J]. 湖南工程学院学报, 2017, 27(2): 28-32.  
LYU Qing, NING Liwei, YAN Xi, et al. Analysis of wind turbine blade de-icing based on gas and heat method[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2017, 27(2): 28-32.
- [22] 罗玉平, 舒禹, 黄宜健, 等. 风力发电机组叶片气热法防除冰系统设计[J]. 机械与电子, 2021, 39(1): 34-42.  
LUO Yuping, SHU Yu, HUANG Yijian, et al. Design of antiicing/deicing system for wind turbine blades by air heating method[J]. Mechanical and Electronic, 2021, 39(1): 34-42.
- [23] OLOUFEMI F, ZOE F, HUSSEIN I, et al. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 662-675.
- [24] 王聪, 黄浩亭, 张勇, 等. 风电机组叶片结冰研究现状与进展[J]. 电力建设, 2014, 35(2): 70-75.  
WANG Cong, HUANG Jietao, ZHANG Yong, et al. Status and advance in research on blade icing of wind turbines[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(2): 70-75.
- [25] 于洪明, 于良峰, 游慧鹏, 等. 风电叶片防冰除冰技术的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(27): 220-222.  
YU Hongming, YU Liangfeng, YOU Huipeng, et al. Research progress of anti icing and de icing technology for wind turbine blades[J]. Materials Review, 2016, 30(27): 220-222.
- [26] 刘军, 陈东亮. 基于神经网络风力发电机组载荷优化控制策略研究[J]. 电气传动, 2014, 44(2): 59-63.  
LIU Jun, CHEN Dongliang. Optimal control strategy for wind turbine load reduction based on neural network[J]. Electric Drive, 2014, 44(2): 59-63.
- [27] 韩爽, 孟航, 刘永前, 等. 增量处理双隐层 BP 神经网络风电功率预测模型[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2238-2244.  
HAN Shuang, MENG Hang, LIU Yongqian, et al. Study on optimization of BP neural network wind power prediction model with two hidden layers[J]. ACTA Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2238-2244.
- [28] 卢晓光, 李风格. 基于数字孪生的风机实时载荷预估研究[J]. 机械与电子, 2021, 39(6): 24-28.  
LU Xiaoguang, LI Fengge. Real time load prediction of wind turbine based on digital twin[J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(6): 24-28.

(责任编辑 杨嘉蕾)