

引用格式:刘忠德,周强,雷和林,等.基于多传热模型数值仿真的风电机组叶片气热防除冰性能强化[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):160-168.

Citation: LIU Zhongde, ZHOU Qiang, LEI Helin, et al. Performance enhancement of gas heat prevention and deicing of wind turbine blades based on numerical simulation of multi-heat transfer model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 160-168.

基于多传热模型数值仿真的风电机组叶片 气热防除冰性能强化

刘忠德¹, 周强¹, 雷和林¹, 邬伟骏¹, 吴江波¹,
李杰², 范必双², 李波³

(1. 国家电力投资集团江西吉安新能源有限公司, 江西吉安 330096; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114;
3. 国网湖南省电力公司防灾减灾中心(电网输变电设备防灾减灾国家重点实验室), 湖南长沙 410100)

摘要:风电机组叶片结冰给风电场的运行安全和发电效益带来双重困扰,迫切需求对结冰较严重的风电机组进行除冰。气热除冰是一种叶片主动抗冰技术,热风热量通过导热—对流综合作用由叶片内表面向外表面传递,融化其上覆冰层。单纯从传热流程来看,气热除冰过程中的热对流和热传导流程并不十分复杂,可以通过系统实验和数值模拟2种方法研究其流动传热特性。然而,实验所需条件较为苛刻,实验成本也较高。针对此问题,基于 $k-\epsilon$ 湍流模型、速度—压力耦合算法及壁面函数等技术建立风机叶片内、外两侧流动与传热耦合模型,分析导热—对流综合作用下的气热防除冰效果,避免传统数值模型只考虑单侧流动与传热的分离式缺陷,能准确获取特定工况下叶片内腔速度场、温度场、压力场以及叶片外壁温度分布,为合理的除冰系统设计及运行控制提供技术指导。研究表明:在不同的送风风速下,叶片表面温度分布呈现两端高、中间低的趋势,且随着风速提升,温度不均衡现象得到了明显改善。当送风风速小于15 m/s时,叶片大部分区域表面温度低于0℃,送风风速增大到20 m/s时表面温度低于0℃区域面积显著减少。

关键词:风电机组叶片抗冰;气热除冰;数值模拟;热分析

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.019 中图分类号: TM315 文章编号: 1673-9140(2024)04-0160-09

Performance enhancement of gas heat prevention and deicing of wind turbine blades based on numerical simulation of multi-heat transfer model

LIU Zhongde¹, ZHOU Qiang¹, LEI Helin¹, WU Weijun¹,
WU Jiangbo¹, LI Jie², FAN Bishuang², LI Bo³

(1. Jiangxi Ji'an New Energy Co., Ltd., State Power Investment Group, Nanchang 330000, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Disaster Prevention and Mitigation Center of State Grid Hunan Electric Power Company (State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation for power transmission and transformation Equipment), Changsha 410100, China)

Abstract: Ice formation on wind turbine blades poses dual challenges to the operational safety and power generation efficiency of wind farms, making it urgent to de-ice wind turbines with severe icing. Air thermal deicing is an active anti-icing technology for blades, where hot air transfers heat from the inner surface to the outer surface of the blade through a combination of conduction and convection, melting the overlying ice layer. From the perspective of the heat transfer process alone, the processes of convective and conductive heat transfer in air thermal deicing are not particularly complex and can be studied through two methods: systematic experimentation and numerical simulation, to investigate their flow and heat transfer characteristics. However, the conditions required for experimentation are quite demanding, and the experimental costs are relatively high. To address this issue, a coupled flow and heat transfer model for both the

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(52208094)

通信作者: 李杰(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事变储能、风机防冰等研究; E-mail: lijie@csust.edu.cn

inner and outer sides of the turbine blade is established based on technologies such as the k- ϵ turbulence model, velocity-pressure coupling algorithm, and wall function. This model analyzes the effectiveness of air thermal deicing under the combined effects of conduction and convection, avoiding the separated defects of traditional numerical models that only consider unilateral flow and heat transfer. It can accurately obtain the velocity field, temperature field, pressure field inside the blade cavity, as well as the temperature distribution on the outer wall of the blade under specific operating conditions, providing technical guidance for the design and operational control of a reasonable deicing system. The research results indicate that under different air supply velocities, the temperature distribution on the blade surface shows a trend of being higher at both ends and lower in the middle, and as the air velocity increases, the temperature imbalance phenomenon is significantly improved. When the air supply velocity is less than 15 m/s, the surface temperature of most areas of the blade is below 0 °C, but when the air supply velocity increases to 20 m/s, the area with a surface temperature below 0 °C is significantly reduced.

Key words: anti-ice of wind turbine blades; air-heating de-icing; numerical simulation; thermal analysis

近年来,随着世界各国低碳发展长期战略不断展开以及对能源需求不断增长,风能作为一种清洁可再生能源正成为实现能源转型的重要助力。然而大量风电机组安装在寒冷地区和(或)高海拔地区,冬季运行时面临冰冻环境的严峻考验。风电叶片结冰会减小翼型升力、增加阻力,导致叶片转矩显著下降,从而严重影响风电机组发电效率;同时,由于覆冰不均匀增加,致使叶片质量分布失衡,产生不对称载荷,进而引发机械故障甚至停机^[1],由覆冰引起的风电不确定性对电网调度、中长期合同电量交易等风电运营带来极大的影响^[2]。因此,风电机组的抗冰冻问题成为风电技术研究的一个热点,发展高效可靠的风电叶片防除冰技术对于风电机组的安全持续运行具有重要的现实意义^[3]。

风电叶片的抗冰冻技术总体上可以分为叶片防冰和叶片除冰技术两大类。叶片防冰即防止叶片表面覆冰,确保叶片在冰冻气候中可以持续运行;叶片除冰是指表面覆冰后去除叶片上的冰层。国内外在叶片防冰、除冰方面发展出几种主要的技术解决方案:①涂料技术,即在叶片表面喷涂特种材料,利用涂料的物理和化学作用,实现叶片的防冰和除冰功能^[4-5];②热空气加热技术,即利用热空气使叶片腔体内表面升温,再通过热传导使叶片壳体表面温度高于结冰温度,从而实现叶片的抗冰冻功能^[6];③电加热技术,是指在叶片壳体内部布设电阻加热元件的抗冰冻技术方案^[7]。除以上3类较为成熟的技术方案外,近年来还出现了微波加热、超声除冰及气囊破冰等防除冰新方法^[8]。在众多的风电机组叶片防除冰技术中,气热防除冰技术具有风险可控、安装方便、无雷击风险及新改建容易等优点,得到一定的推广应用,其工作原理示意如图1所示。该除冰系统主要由鼓风机、加热器和导热管以及加控制系统构成,其工作原理为鼓风机将加热

器加热的热空气通过导管运送到叶片覆冰严重的部位,热空气在叶片前缘与腹板之间流到叶片后缘与腹板之间,从而覆盖整个叶片内腔,加热的热空气以对流换热的方式将热量传给叶片,叶片再以导热的方式传给冰块,使冰块融化。但是由于风电机组叶片结构复杂,不同风电机组叶片的气热防除冰技术应用效果差异较大,需要通过数值模拟仿真方法^[9-11]进一步摸清其热力学传导原理,在不同环境温度、风速、加热功率及风道布局下,模拟风电机组叶片气热防除冰效果。

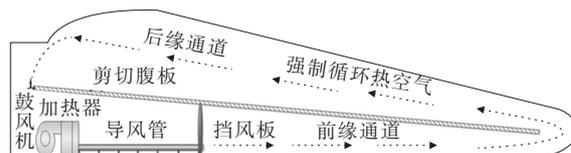


图1 气热法工作原理示意

Figure 1 Operation principle of gas heat deicing

文献[12]建立三维换热和二维BP神经网络模型,对风机叶片的流固耦合传热过程分别进行数值研究,结果表明,在叶片前缘中部气热除冰难度最大;另外,环境温度、PVC材料导热系数和叶片长度是影响最低除冰气流温度的关键参数,其中,叶片长度的影响权重可达14.3%。文献[13]针对大型风电机组叶片的气热抗冰系统的工程化应用开展了相关风电场试验,结果表明,在静态融冰效果测试下,除冰系统在环境温度为-10 °C左右时,对因结冰导致停机的叶片能够有效除冰;在动态防冰功能测试下,除冰系统在结冰环境下可使叶片达到持续防冰效果并持续发电。文献[14]探讨了2 MW机组叶片气热法防除冰技术工程应用的系统设计,重点围绕加热系统设计、供电电源选择以及结冰监测与控制系统架构展开研究,为推进风电机组叶片气热法防除冰系统现场工程改造提供借鉴。文献[15]

对风电机组叶片传热过程中的对流换热及导热过程进行理论计算,并利用数值仿真方法对除冰所需时间进行了模拟研究,得到了除冰所需时间、各传热过程传热量及最佳除冰温度下空气加热器的最小输出量。文献[16]对叶片主梁梁帽、前缘及后缘构建壳层传热模型,并对不同温度载荷条件进行数值模拟,结果表明,由于主梁材料的导热性能优于前缘和后缘,主梁较前缘和后缘可更快达到平衡状态。文献[17-18]建立了风电机组叶片防冰的数值计算模型,采用 $k-\omega$ SST 湍流模型计算叶片周围流场,基于 Messinger 控制体思想建立叶片表面热平衡方程,并实验验证了该模型有效性,通过该模型计算得出由于正攻角的存在,迎风面略低于背风面前缘防冰区域的温度等结论。文献[19]对典型风力涡轮机叶片模型表面的动态积冰过程进行实验研究,对风力涡轮机叶片表面复杂积冰结构的时间演化进行量化分析,为风电机组叶片防冰设计提供参考,其涡轮叶片模型上积冰结构的3D形状变化数据可用于验证各种经验和理论模型。

综合对比可知,以上气热防除冰方法研究均是基于单一传热模型对叶片表面温度变化及叶片覆冰融化过程进行热分析,少有基于多传热模型对叶片内部温度场与叶片表面温度场的耦合作用的研究,故而本文重点利用数值模拟方法建立对流—导热综合作用下的气热防除冰作用模型,其中,传热模型主要包括外部大气环境与叶片外表面的对流换热模型、叶片的导热模型以及叶片内流场的对流换热模型及其相互耦合。通过分析特定工况下叶片内腔的速度场、温度场、压力场及叶片外壁的温度分布,从而得出合理的除冰结构设计。

1 数学模型

1.1 湍流微分方程

本文模拟的是三维、常物性及不可压缩流体,使用雷诺时均方程^[19],连续、动量、能量方程分别为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{T})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{T} + \rho \overline{u'_j T'}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

式(1)~(3)中, \bar{u}_i, u'_i, x_i, t 分别为 i 方向的时均速度、脉动速度、坐标、时间; \bar{p}, \bar{T}, T' 分别为时均压力、时均温度、脉动温度; ρ, μ, Γ 分别为密度、动力粘度、热扩散系数。

1.2 Standard $k-\epsilon$ 模型

数值模拟使用的湍流模型是 Standard $k-\epsilon$ 模型, k 为湍流脉动动能, $k = \overline{u'_i u'_i} / 2$, ϵ 为脉动动能耗散率, $\epsilon \approx k^{3/2} / l$, l 为湍流长度标尺。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \epsilon (G_k + C_{3\epsilon} G_b) / k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon^2 / k + S_\epsilon \quad (5)$$

式(4)、(5)中, G_k 为由平均速度梯度产生的湍流动能; G_b 为由浮力而产生的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流中的波动膨胀对总体耗散率的贡献; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 均为常数, ANSYS Fluent 中默认 $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 分别等于 1.44、1.92、0.09; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为 k, ϵ 对应的普朗特数, ANSYS Fluent 中默认 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为 1.0、1.3; S_k, S_ϵ 为用户自定义源项; $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ 。

1.3 数值模型仿真与实验结果对比分析

文献[20]对某 2 MW 风电机组开展了热力学实验,其中,风机叶片总长 42.5 m,实验总时长为 9 h,导风管送风温度在前 2 h 为 80 °C,此后以 90 °C 加热 7 h,同时,实验过程也监测了距叶根 15 m 处内、外表面的温度变化。本文根据文献[20]中的实验工况,建立相应的数值模型。由于外部流场复杂,故选用实验监测的内表面温度进行本工作数值模型的验证,如图 2 所示。

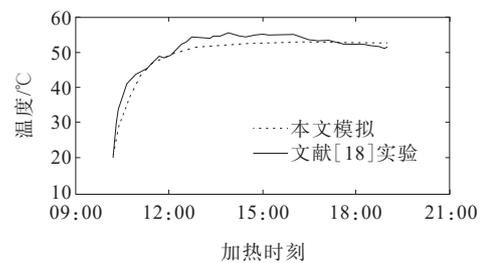


图 2 数值模拟的温度变化趋势与参考文献[20]的实验对比

Figure 2 Comparison of temperature variation trend between the numerical simulation and the experiments from reference [20]

由图 2 可以看出,本文工作数值模拟的温度与文献中测量得到的温度趋势一致,模拟值相对于实验值偏低,这是因为模拟过程中叶片外壁面对流换

热系数是一个给定的值,相对于实验,热量损失会偏高,导致预测的温度较实验偏低。此外,分析数值模拟与实验的相对误差曲线如图 3 所示,可以看出,本文工作数值模拟的温度与实验的最高、最低温度的相对误差分别为 14.42%、0.17%,大部分加热时间对应的相对误差低于 6%。验证了数值模型的准确性。

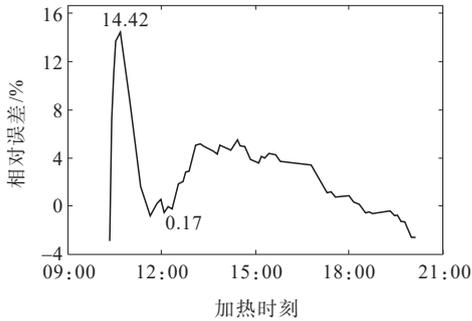


图 3 数值模拟与文献[20]中实验的相对误差

Figure 3 Relative error between numerical simulation and experiments from reference [20]

2 建模分析

根据叶片尺寸及叶片外场仿真要求建立物理模型,模型结构及尺寸如图 4 所示。

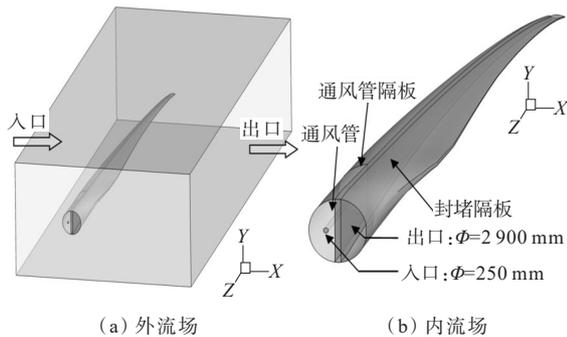


图 4 叶片外流场、内流场通风模型

Figure 4 Ventilation model of blade outer and inner flow fields

叶片外流场模型的 x 、 y 、 z 方向尺寸分别为 28.0、14.0、69.8 m,其左侧为速度入口,右侧为压力出口;叶片内流场几何尺寸按照实际模型导入,厚度为 20 mm,其热气流通过通风管入口导入,直径 $\Phi=250$ mm,叶片中间设置 2 块隔板进行封堵,入口同侧半圆设置为排风口,其直径 $\Phi=2900$ mm。

为了系统研究叶片各段在热气流加热作用下的温度变化率及达到稳态后的温度分布情况,将叶片前缘除通风管段外部分(除冰重点关注区域)划分为前缘前、中、后 3 段,其尺寸均为 18.5 m,如图 5 所示。

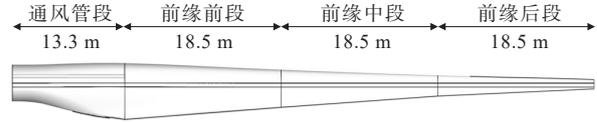


图 5 叶片分段结构及定位尺寸

Figure 5 Blade segmented structure and positioning dimensions

2.1 模型网格划分

用 GAMBIT 对模型进行网格划分^[19]。由于叶片局部畸变较大,全局采用结构网格划分时局部网格质量较差,影响计算精度和收敛效率,故内部区域选择网格质量较高的结构化网格,外流场区域选择网格适应性较好的四面体非结构网格;同时,由于模型尺寸较大,在重点关注的叶片附近区域进行网格加密处理,而远流场区域则相应增大网格尺寸,减少计算资源消耗,最终全域划分的网格总数量约为 500 万。详细的外部 and 内部流场网格划分如图 6 所示。

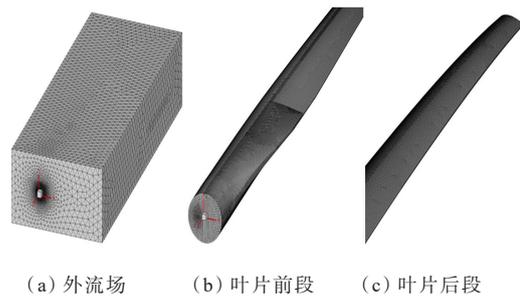


图 6 叶片外流场、内流场网格划分

Figure 6 Meshing of blade outer and inner flow fields

2.2 材料属性设置

叶片材料主要为玻璃钢和巴沙木组成的复合结构,外流场为 -5 或 -10 $^{\circ}\text{C}$ 空气,其物性参数如表 1 所示。为简化计算,玻璃钢和巴沙木厚度分别设置为 18、4 mm。

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

材料	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ (kg/m^3)	比热容/ $(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	导热系数/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	粘度/ (10^{-5}) $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
空气	-5	1.318×10^0	1 007	0.024 0	1.69
	-10	1.342×10^0	1 009	0.023 6	1.67
玻璃钢	—	1.906×10^3	1 100	0.300 0	—
巴沙木	—	1.200×10^2	1 800	0.100 0	—

2.3 边界条件设置

模型边界条件设置如图 7 所示,叶片外流场左

侧为速度入口边界,其速度为10 m/s,温度分别为-5、-10℃,右侧为压力出口边界,前后上下均为滑移壁面边界;叶片内流场左侧通风管端面为速度入口边界,速度分别10、15、20 m/s,温度为60℃,出口为压力出口边界条件,两隔板为内部壁面边界,叶片为耦合壁面边界。

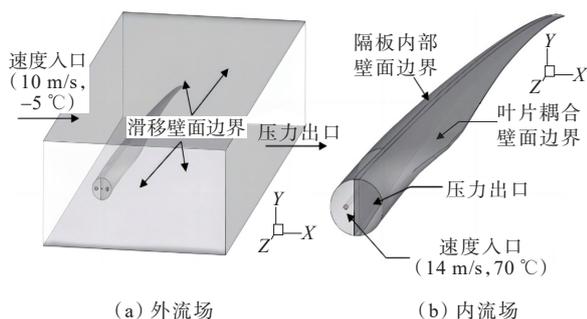


图7 叶片外流场、内流场边界条件设置情况

Figure 7 Boundary conditions setting of blade outer and inner flow fields

2.4 模型设置分析

当叶片外表面温度高于0℃时,叶片覆冰内层即能有效融化,从而使冰层整体脱落。此外,考虑实际情况下叶片覆冰层能有效增大散热热阻,即覆冰层具有良好保温作用,更有利于强化气体热量传递到叶片外表面后的除冰效果,故本文以叶片外表面直接裸露在低温环境中为依据,对气热除冰分析更加严苛。因此,本文通过研究直接暴露条件下的叶片外表面温度分布,可以得到叶片实际除冰能力。

2.5 求解器设置

数值模拟软件选用ANSYS-FLUENT 17.2,湍流模型、速度-压力耦合算法、离散格式、亚松弛因子(能量方程易超温,故修正为较小值0.6)及收敛残差等参数如表2所示。

表2 求解模型设置

Table 2 Solve model settings

求解模型设置	
求解器	ANSYS-FLUENT 17.2
后处理	Tecplot
湍流模型	Standard $k-\epsilon$, 增强壁面函数
速度-压力耦合算法	SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)
离散格式	二阶迎风
亚松弛因子	默认数值(除能量方程0.6外)
收敛残差	连续性方程: 10^{-4} , 动量方程: 10^{-4} , $k-\epsilon$: 10^{-4} , 能量方程: 10^{-6}

3 结果分析

3.1 流场分析

叶片外流场整体流线如图8所示,其左侧标尺为速度区间(7~15 m/s),可以看出,外流场整体流线较均匀,但在叶片附近流线出现明显绕流,叶片前缘前段上、下部分速度较大,导致这一部分散热更显著。当进口速度为10 m/s时,叶片内流场整体及局部流线如图9所示,其左侧标尺为速度区间(0~30 m/s),可以看出,由于叶尖截面积急剧收缩,使得此处流速急剧升高,达到30 m/s,这将强化叶尖处的换热效果,使其有利融冰;前缘前段及中段速度较低,导致传热系数较低,影响此两段换热效果,这种情况可能导致融冰速度较慢;当进口速度为15、20 m/s时,流线分布趋势基本一致,其最大速度分别为50、70 m/s。

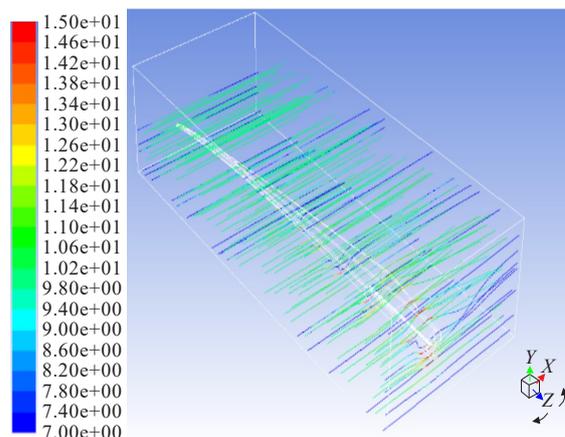


图8 叶片外流场整体流线

Figure 8 Overall streamline of blade outer flow field

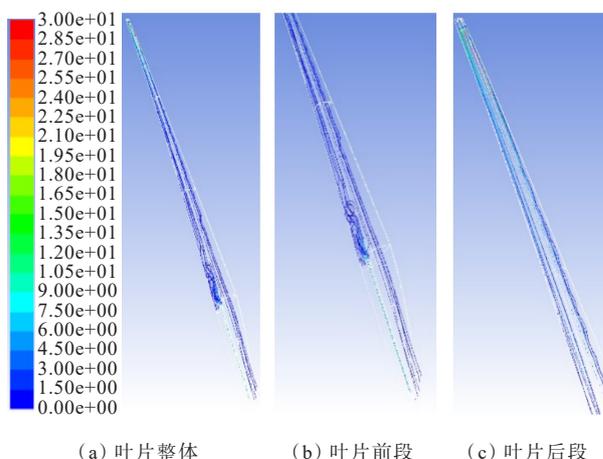


图9 叶片内流场整体流线

Figure 9 Overall streamline of blade inner flow field

3.2 压力场分析

当进口速度分别为 10、15、20 m/s 时,叶片内压力云如图 10 所示;壁面附近压力场分布情况如表 3 所示。由图 10、表 3 可以看出,进口速度越大,叶片内腔流阻越大,速度为 10、15、20 m/s 时叶片内最大压强分别为 600、1 400、2 200 Pa,且大部分流阻发生在叶尖区域内。

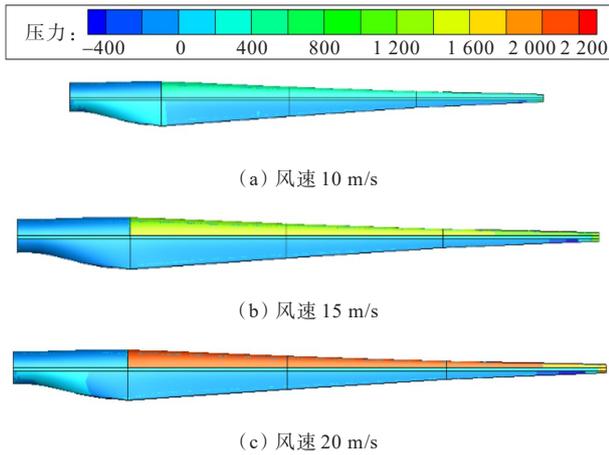


图 10 不同进口速度下叶片内压力云
Figure 10 Pressure cloud map of blade

表 3 壁面附近压力场分布情况

Table 3 Pressure field distribution near wall

风速/ (m·s ⁻¹)	前缘侧均压/Pa			后缘侧均压/Pa		
	叶根	叶中	叶尖	叶尖	叶中	叶根
10	600	590	520	-15	-2	0
15	1 400	1 380	1 100	-50	-5	0
20	2 200	2 130	1 920	-80	-10	0

通过不同风速条件下的压力分布可知,风量越大叶片压力损失越大,风机需提供的压力也越大,这为风机选型提供了技术指导,此外,通过图 10、表 3 沿程压力变化可知,压力损失主要发生在叶尖位置,在保证叶片加热效果前提下,可着重对此处结构进行改进以减小压力损失。

3.3 温度场分析

当室外温度分别为 -5、-10 °C 且不同送风风速(10、15、20 m/s)时,叶片前缘各段外表面温度随通风时间变化情况如图 11 所示,可以看到,前缘前段升温响应最短,以 10 m/s 时为例,通风开始 20 min 左右,-5、-10 °C 条件下此段即开始升温,而中、后段在 -5、-10 °C 条件下升温响应则分别有 50、60 min 左右延迟;随着通风风速增大,各段热响应延迟降低,当送风风速增大到 20 m/s 时,两者响应延

迟均缩短为 25~35 min。此外,从达到稳态所耗费时间上来看,与前缘前段相比,前缘中、后段的响应速度存在一定滞后。在 -5 °C 条件下、送风风速分别为 10、20 m/s 时,左、右各段平均温度均达到最大且基本保持稳定的时间分别为 120、90 min,此时叶片前缘的前、中、后段温度分别为 0.8、-0.2、4.0 °C 和 4.4、3.8、8.9 °C;在 -10 °C 条件下、送风风速分别为 10、20 m/s 时,左、右各段平均温度均达到最大且基本保持稳定的时间分别为 150、120 min,叶片前缘的前、中、后段温度分别为 -1.4、-2.3、2.4 °C 和 3.1、1.9、7.6 °C。

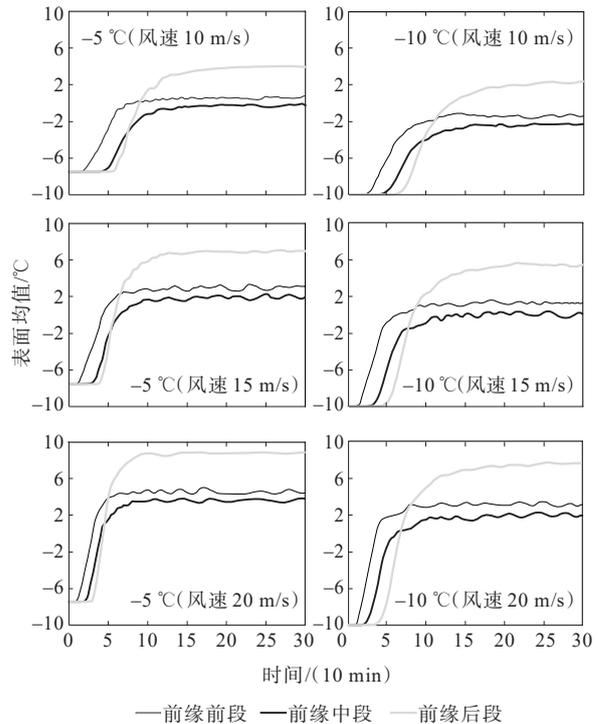


图 11 叶片前缘各段外表面平均温度随时间变化情况

Figure 11 Average temperature variation of outer surface of blade leading edge with time

在不同送风风速(10、15、20 m/s)时,叶片外表面最终达到稳态时的温度云分别如图 12(环境温度为 -5 °C)、13(环境温度为 -10 °C)所示,可以看出,3 种送风风速下叶片前缘表面温度均呈现出分布不均特征,整体温度分布呈现两端高、中间低之趋势,前缘前、中段温度较低,为 -2~6 °C,前缘后段温度较高,约为 4~8 °C。此外,当送风风速较低时,前缘前、中段部分位置出现冰点,这会导致覆冰生长。与 -5 °C 相比,-10 °C 时(图 13)3 种送风风速下叶片前缘表面温度分布特征与 -5 °C 时一致。此外,2 种温度条件下叶面整体温度分布随着入口风速的增加不断升高,高温区域在不断发展。

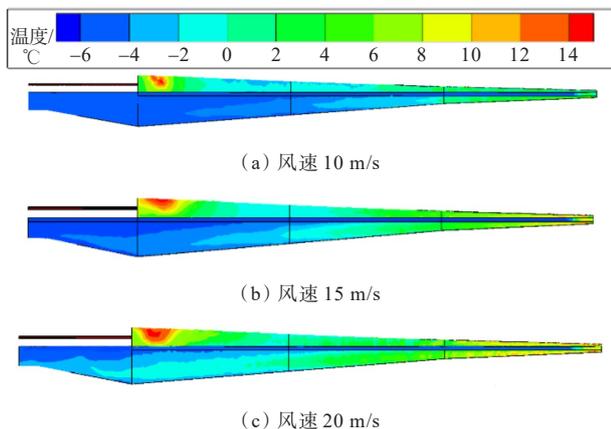


图 12 叶片外表面温度云(-5 °C)
Figure 12 Temperature cloud on outer surface of blade (-5 °C)

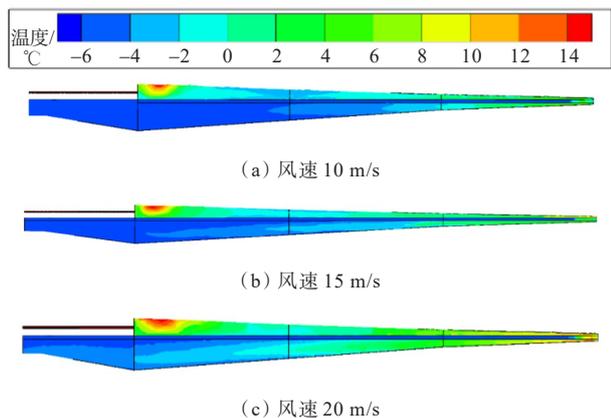


图 13 叶片外表面温度云(-10 °C)
Figure 13 Temperature cloud on outer surface of blade (-10 °C)

在不同送风风速及不同外界环境温度条件下,叶片外部前缘部分各段温度分布统计情况如表4、5及图14所示。

根据统计结果可知,当环境温度为-5 °C且送风风速条件较小时,叶片表面前、中段出现较大0 °C以下区域;当环境温度为-10 °C时,0 °C以下区域进一步增加,这会导致叶片外表面出现较大结冰区域,影响叶片正常运转。与之相比,3种送风风速条件下叶片前缘后段整体温度均较高,0 °C以下区域很少。此外,当外界温度为-5 °C且送风风速较小时,叶片前缘前、中段温度分布主要集中在0 °C以下,后段温度分布集中在2~6 °C;风速较大时前缘各段温度集中在2~8 °C。综合各段平均温度可知,中段温度最低、前段温度次之、后段温度最高,与前段相比,中、后段温度分布均匀。-10 °C时的温度分布情况与-5 °C时类似,但整体往低温方向移动。

-5、-10 °C这2种外界温度条件下进出口温度分布及散热总量情况分别如表6、7所示。散热量的计算公式如下:

$$P=Cm_v(T_{in}-T_{out}) \quad (6)$$

式中, P 为散热量; m_v 为质量流量; C 为空气比热容; T_{in} 为入口平均温度; T_{out} 为压力出口平均温度。

根据统计结果,以10 m/s为例,叶片内腔进口空气温度为60.0 °C,质量流量为0.6 kg/s,当外界温度分别为-5、-10 °C时,出口温度分别为7.5、-6.4 °C,外界空气带走叶片热量,分别为31.7、40.1 kW。随着送风风速增大,热量散失不断增加,送风风速达到20 m/s时叶片散热量分别为53.3、67.2 kW。

表 4 室外温度-5 °C时不同送风风速条件下叶片表面温度分布情况

Table 4 Statistical table of blade surface temperature distribution under different air speeds at outdoor temperature -5 °C

送风风速/前缘 (m·s ⁻¹)	部位	面积占比百分数/%					
		0 °C以下	0~2 °C	2~4 °C	4~6 °C	6~8 °C	8 °C以上
10	前段	57.1	18.3	12.4	5.2	4.2	2.8
	中段	63.9	33.7	2.4	0.0	0.0	0.0
	后段	2.8	12.1	34.5	38.4	12.2	0.0
15	前段	24.9	11.1	23.5	25.4	8.1	7.0
	中段	31.3	20.4	28.6	19.7	0.0	0.0
	后段	0.0	5.1	16.5	30.4	27.2	20.8
20	前段	8.2	12.6	20.9	31.6	15.7	11.0
	中段	6.3	17.4	36.6	31.7	8.0	0.0
	后段	0.0	0.0	7.5	21.4	26.2	44.9

表 5 室外温度-10 °C时不同送风风速条件下叶片表面温度分布情况

Table 5 Statistical table of blade surface temperature distribution under different air speeds at outdoor temperature -10 °C

送风风速/前缘 (m·s ⁻¹)	部位	面积占比百分数/%					
		0 °C以下	0~2 °C	2~4 °C	4~6 °C	6~8 °C	8 °C以上
10	前段	81.9	8.2	5.3	2.3	1.5	0.8
	中段	95.9	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	后段	5.0	38.1	38.4	12.2	6.3	0.0
15	前段	38.9	20.1	20.1	16.4	2.5	2.0
	中段	50.3	22.4	23.6	3.7	0.0	0.0
	后段	3.0	10.1	22.5	32.4	20.2	11.8
20	前段	17.2	13.6	28.9	27.6	7.7	5.0
	中段	18.3	31.4	30.6	17.7	2.0	0.0
	后段	0.0	0.0	18.5	32.4	20.2	28.9

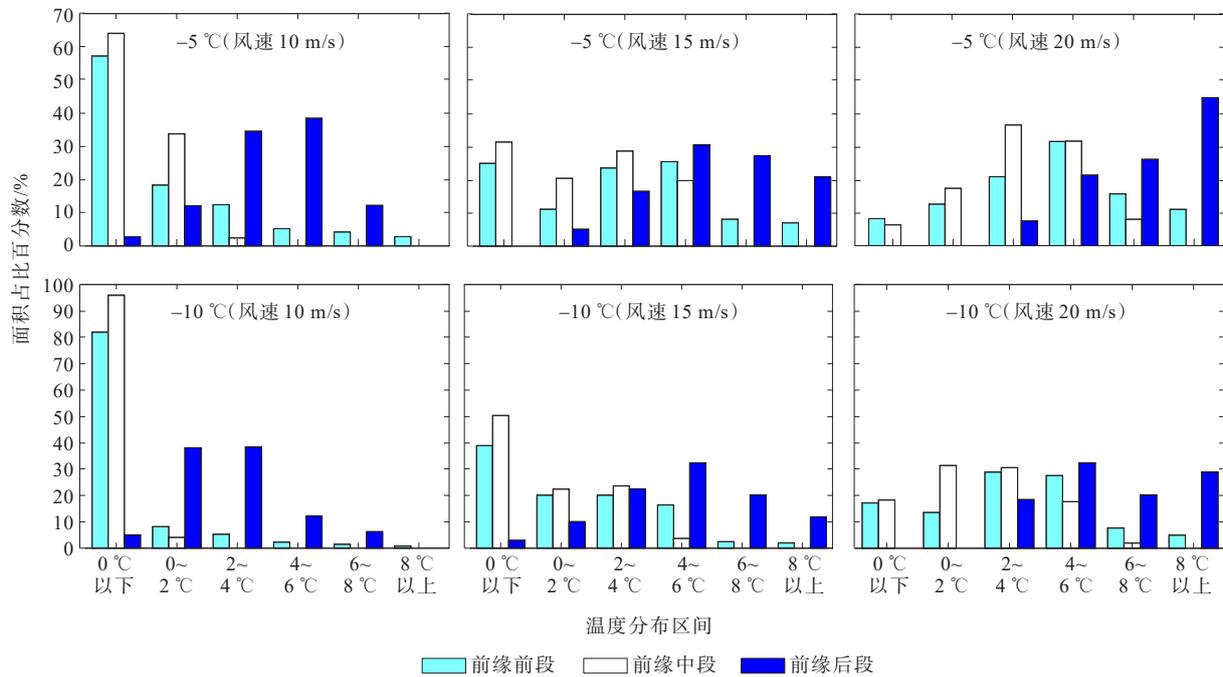


图 14 叶片前缘各段外表面温度区间分布情况

Figure 14 Surface temperature interval distribution of each section of blade leading edge

表 6 室外温度-5°C时进出口温度分布及总散热量

Table 6 Temperature distribution of inlet and outlet and total heat dissipation at outdoor temperature -5°C

送风风速/ (m·s ⁻¹)	质量流量/ (kg·s ⁻¹)	速度入口 均温/°C	压力出口 均温/°C	散热量/ kW
10	0.6	60	7.5	31.7
15	0.9	60	13.2	42.3
20	1.2	60	15.8	53.3

表 7 室外温度-10°C时进出口温度分布及散热总量

Table 7 Temperature distribution of inlet and outlet and total heat dissipation at outdoor temperature -10°C

送风风速/ (m·s ⁻¹)	质量流量/ (kg·s ⁻¹)	速度入口 均温/°C	压力出口 均温/°C	散热量/ kW
10	0.6	60	-6.4	40.1
15	0.9	60	0.0	54.2
20	1.2	60	4.3	67.2

4 结语

本文基于 Ansys Fluent 搭建风电机组叶片气热除冰数值模拟仿真平台,建立叶片内腔、本体及外部多温度场耦合传热模型,分析了不同环境温度、热风风速条件下的导热—对流综合防除冰效果,并与实验对比,验证了数值模型的准确性。数值仿真结果表明:在不同的送风风速下,叶片表面温度分布均呈现两端高、中间低的趋势,而且随着风速的

提升,温度不均衡现象得到了很大的改善,仿真结果与现场除冰情况相符。数值模拟不仅能够准确获取特定工况下叶片内腔速度场、温度场、压力场及叶片外壁温度分布,而且能够通过仿真计算出满足叶片除冰条件的加热器加热功率,为风电机组叶片气热除冰系统参数最优化配置提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 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+251.
YU Hongming, YU Liangfeng, YOU Huipeng, et al. Research progress of anti-icing and deicing technology for wind turbine blades[J]. Materials Review, 2016, 30 (27): 220-222+251.
- [2] 刘军,龚健荣,孙瑜,等.虑风电不确定性的中长期合同电量分解[J].电力科学与技术学报,2021,36(3): 84-91.
LIU Jun, GONG Jianrong, SUN Yu, et al. Mid-long term contract energy decomposition considering wind power uncertainty[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 84-91.
- [3] 白宏伟,代海涛,刘伟超,等.冰冻气候下的风电叶片及其抗冰冻技术[J].风能产业,2015(3): 22-29.
BAI Hongwei, DAI Haitao, LIU Weichao, et al. Wind turbine blade and its anti-freezing technology in freezing climate[J]. Wind Energy Industry, 2015(3): 22-29.
- [4] 王延明,倪爱清,王继辉,等.电热元件—疏水涂层复合除冰系统的实验研究[J].玻璃钢/复合材料,2016 (8): 68-72.

- WANG Yanming, NI AiQing, WANG Jihui, et al. Experimental study of hybrid de-icing systems combining the rmoelectric and hydrophobic coatings[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*,2016 (8): 68-72.
- [5] MA L,ZHANG Z,GAO L,et al.An exploratory study on using slippery-liquid-infused-porous-surface (SLIPS) for wind turbine icing mitigation[J].*Renewable Energy*,2020, 162: 2344-2360.
- [6] 顾海雷,张云芳.飞机外表面气热防冰专利技术发展分析[J].*中国新技术新产品*,2017(17):109-110.
GU Hailei, ZHANG Yunfang. analysis on the development of patent technology of air-thermal anti-icing on the outer surface of aircraft[J].*New Technology & New Products of China*,2017(17): 109-110.
- [7] 舒立春,戚家浩,胡琴,等.风机叶片电加热防冰模型及分区防冰方法[J].*中国电机工程学报*,2017,37(5): 1448-1455.
SHU Lichun, QI JiaHao, HU Qin,et al. Anti-icing model and sectionalized anti-icing method by electrical heating for wind turbine blades[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017,37(5): 1448-1455.
- [8] GUO W,DONG X,LI Y,et al. Simulations on vibration mode and distribution of shear stress for icing aluminum plate excited by ultrasonic vibration[J]. *Advances in Mechanical Engineering*,2020,12(3): 75-85.
- [9] YASLIK A D,DE WITT K J,KEITH JR T G,et al.Three-dimensional simulation of electrothermal deicing systems [J].*Journal of Aircraft*,1992,29(6): 1035-1042.
- [10] 郭向华,邓锋华,肖雁,等.基于数值模拟与风洞试验的多分裂导线阻力系数干扰效应[J].*电力科学与技术学报*,2022,37(1): 186-192.
GUO Xianghua, DENG Fenghua, XIAO Yan, et al. Study of interference effect of bundled conductors drag coefficient based on numerical simulation and wind tunnel test[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2022,37(1): 186-192.
- [11] 邹建章,张丹丹,张宇,等.湍流度对二分裂新月形覆冰绞股导线气动力特性的影响研究[J].*高压电器*, 2023,59(3):78-85.
ZOU Jianzhang, ZHANG Dandan, ZHANG Yu, et al. Study on effect of turbulivity on aerodynamic characteristics of two-bundled crescent-shaped ice-covered stranded wire[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(3): 78-85.
- [12] 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 Anming, 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.
- [13] 冯学斌,杨文涛,陈海根,等.大型风电机组叶片的气热抗冰关键技术及工程应用实践[J].*太阳能*,2019(2):61-66.
FENG Xuebing, YANG Wentao, CHEN Haigen, et al. Key technology and engineering application of air-thermal ice resistance of large-scale wind turbine blades[J]. *Solar Energy*,2019(2):61-66.
- [14] 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):34-37+42.
LUO Yuping, SHU Yu, HUANG Yijian, et al. Design of anti-icing/deicing system for wind turbine blades by air heating method[J]. *Machinery&Electronics*, 2021, 39(1): 34-37+42.
- [15] 杨博,宁立伟,魏克湘,等.基于汽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 wind turbine blade deicing based on steam thermal method[J]. *Fiberglass Reinforced Plastics/Composites*,2018(4):68-73.
- [16] 李伟,王顺燕,文飞,等.风力机防除冰的复合材料叶片传热分析与试验研究[J].*复合材料科学与工程*,2022 (9): 76-82.
LI Wei, WANG Shunyan, WEN Fei, et al. Research on heat transfer analysis and test of wind turbine composite blade for anti-icing and deicing[J]. *Composites Science and Engineering*,2022(9): 76-82.
- [17] 邱刚,舒立春,胡琴,等.风力发电机叶片防冰的数值计算模型及现场试验研究[J].*中国电机工程学报*,2018,38 (7):2198-2204+2235.
QIU Gang, SHU Lichun, HU Qin, et al. Numerical anti-icing model and field experimental investigation of wind turbine blade[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 2198-2204+2235.
- [18] 于周,舒立春,胡琴,等.风机叶片气动脉冲除冰结构脱冰计算模型及试验验证[J].*电工技术学报*,2023,38(13): 3630-3639.
YU Zhou, SHU Lichun, HU Qin, et al. De-icing calculation model of pneumatic impulse de-icing structure for wind turbine blades and experiment verification[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2023,38(13):3630-3639.
- [19] GAO L,VEERAKUMAR R,LIU Y,et al.Quantification of the 3D shapes of the ice structures accreted on a wind turbine airfoil model[J].*Journal of Visualization*,2019,22 (4): 661-667.
- [20] 王昭力,刘小春,文飞,等.2 MW风机叶片气热法防除冰的传热试验研究[J].*可再生能源*,2022,40(3):356-361.
WANG Zhaoli, LIU Xiaochun, WEN Fei, et al. Heat transfer test research on air heating anti-icing/deicing of 2 MW wind turbine blades[J]. *Renewable Energy Resources*,2022,40(3): 356-361.