

文章编号: 0254-0096(2020)06-0041-06

# 散热孔射流对机舱风速影响的数值模拟

吴根勇<sup>1~3</sup>, 陈成城<sup>2,3</sup>, 王晓东<sup>4</sup>, 丁林<sup>4</sup>, 叶昭良<sup>4</sup>,

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014;

2. 浙江运达风电股份有限公司, 杭州 310012; 3. 风力发电系统国家重点实验室, 杭州 310012;

4. 华北电力大学, 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 采用计算流体力学模拟(CFD), 研究某2 MW风电机组机舱附近的流动结构, 分析机舱顶部散热器及其射流对机舱附近流动的影响, 评估其对机舱风速仪位置处风速的影响。结果显示, 风速仪的高度具有一定的最优区间; 散热器及其射流对风速仪高度处的平均风速影响不大。在叶片典型位置处, 散热器对风速仪高度处的风速有明显影响, 散热射流一定程度上可削弱这种影响。

**关键词:** 风电机组; 尾流; 风速仪; 散热器; 数值模拟

**中图分类号:** TK83

**文献标志码:** A

## 0 引言

风电是当前最为主要的可再生能源形式之一。风电机组是风力发电的基础。测风是风电机组设计与运行中一项重要工作, 关系到风电机组的功率验证、运行控制等。当前, 风电机组的测风数据普遍采用机舱风速仪, 机舱风速仪周围的流动受自然来流、风轮绕流和机舱细部结构的影响, 其测得速度与机组远前方来流速度有一定差别, 需要进行修正。最常用的机舱风速修正方法是基于泰勒涡冻结假设的平均风速拟合法。在 IEC 标准 61400-12-2:2013 中, NTF 主要通过测风塔和机舱测风仪的平均风速数据拟合得到<sup>[1]</sup>。文献[2]研究发现 IEC 标准提出的拟合方法对自由来流的预测并不准确, 只适用于未偏航、未变桨和平坦地形。原因是这些无明确物理意义的函数关系式没有体现数据背后的物理机制<sup>[3]</sup>。另一种方法基于空气动力学理论, 通过理论模型或者计算流体力学获得机舱绕流场参数, 进而获得机舱风速与来流风速的修正关系。文献[4-7]采用制动盘模型或制动线模型模拟了机舱周围的流场, 发现大气湍流波动、上游风电机组的尾流和机舱偏航对机舱风速仪附近流动有很大影响。制动线模拟结果比制动盘模拟更贴近实验结果。但制动盘与制动线方法只能给出平均风速的关

联, 无法获得机舱附近真实的流动结构。由于机舱位于风电机组叶片内叶展厚翼型段和圆柱段的下游, 其附近流动受到厚翼型段和圆柱段分离流动的影响, 流动的三维非定常特征明显。文献[8]建立了风轮几何模型, 采用雷诺平均(RANS)模拟研究了机舱附近的流动, 发现风轮叶片的分离流动、机舱偏航和来流的俯仰对机舱风速有明显影响, 而且风向误差更为敏感。文献[9]比较了2种叶片绕流对机舱尾部测风仪的影响, 发现同样长度但不同形状的叶片, 机舱风速有1%~3%的差别。文献[10]采用 RANS 研究了某5 MW风电机组机舱附近的流动, 指出 T 型阻流板对风速仪和风向仪影响很大。

当前, 对于机舱细部结构对机舱风速影响的研究很少。文献[11]采用 RANS 模拟, 研究机舱散热口排出的热空气对风速仪的影响, 但未考虑风轮尾流的影响。为评估机舱散热孔及其排气射流对机舱风速风向测量结果的影响, 本文采用 CFD 模拟对某大型风电机组机舱附近流动进行研究, 以为机舱散热孔与机舱风速仪相对位置的布置提供参考。

## 1 几何模型与计算方法

### 1.1 几何模型

本文计算的物理模型采用运达风电公司的某2 MW

收稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51576065); 风力发电系统国家重点实验室开放基金(2017001)

通信作者: 王晓东(1979—), 男, 博士、副教授, 主要从事风力机空气动力学方面的研究。wangxd@ncepu.edu.cn

风电机组,风轮直径为 116 m,轮毂直径为 3.6 m,机舱长宽高最大值分别为 10.8 m×4.2 m×3.8 m,与水平方向有 5°的仰角,几何模型如图 1 所示。本文主要关注机舱顶部区域的绕流场分布,塔架对此处的流动的影响很小,因此模型中不包括塔架。

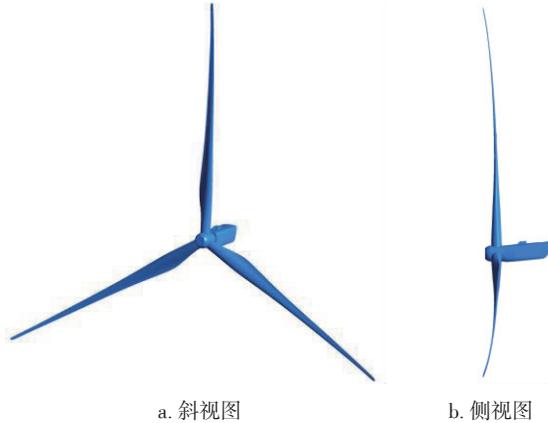


图 1 风力机叶片与机舱模型

Fig. 1 Model of wind turbine blades and nacelle

机舱风速仪通常布置在机舱的尾部附近。机舱顶部散热器布置在风速仪上游,位于机舱中部。散热器为梯形,长宽高最大值分别为 2.13 m×1.51 m×0.65 m。散热器后表面为排气孔,根据其排气流量计算可得其排气速度约为 8 m/s,方向沿散热器后表面的法向。

## 1.2 计算方法

根据对湍流模拟方法的不同,CFD 可分为雷诺平均模拟(RANS)、大涡模拟(LES)和直接数值模拟(DNS)。由于风电机组叶片绕流雷诺数较高,LES 与 DNS 的计算量过大,因此本文采用 RANS 模拟。图 2 为所采用的计算域。计算域分为转动域和静止域。旋转域的旋转轴与风轮转轴重合,为了使旋转域和静止域计算过渡平滑,旋转域在风轮圆周外侧延伸了 0.05 倍风轮直径( $D$ ),即沿径向为  $1.05D$ ;在轮毂前方沿轴向( $z$ )向前延伸  $0.25D$ 。保证风力机绕流不受边界限制的影响,静止域在旋转域的基础上向上游延伸  $1.75D$ ,径向延伸  $5.95D$ ,使得上游进口边界与外场边界离轮毂和叶尖的距离分别为  $2D$  和  $6D$ 。计算域在机舱下游延伸  $5D$ 。因为本文主要研究机舱附近的流动,因此可以满足机舱附近流动受出口边界影响很小。静止域外边界设置为远场边界条件。静止域与旋转域交接面设置为转静交接面。风轮叶片、轮毂和机舱表面设置为无滑移固壁。

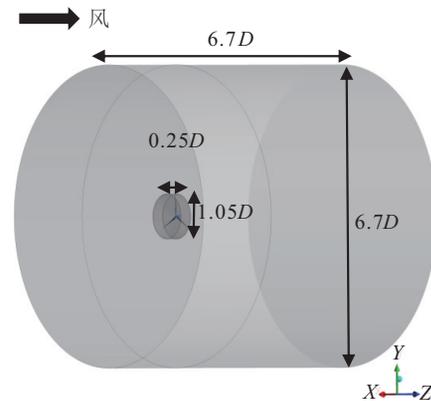


图 2 计算域设置

Fig. 2 Computational domain

旋转域内包含叶片和轮毂,采用 AutoGrid 生成整个结构化贴体网格。网格生成参考本课题组前期工作<sup>[12]</sup>,网格数为 362 万,叶片表面和轮毂第一层网格高度为 1 mm。静止域内包含机舱,采用 ICEM 生成结构化体贴网格。若将机舱上表面近似为平板,根据平板湍流边界层的经验公式,估算风速仪位置处的边界层厚度约为 120 mm,边界层较厚。因此,设置机舱表面第一层网格高度为 10 mm,边界层内设置约 10 个网格。在散热器附近进行网格加密,静止域网格数为 367 万。图 3 所示为风轮和机舱几何的局部放大图及其表面网格。

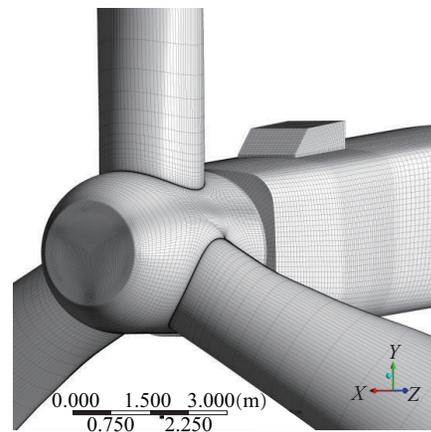


图 3 风轮和机舱表面网格

Fig. 3 Surface mesh of wind turbine and nacelle

风电机组上游的来流速度设为 9 m/s。求解器采用商用软件 CFX 进行数值计算,有限体积方法对控制方程进行离散,压力-速度耦合基于 SIMPLE 算法,控制方程的各项均采用二阶迎风格式。湍流模型的选取参考了课题组前期工作<sup>[12]</sup>,采用全湍流 SST 模型。本文主

要研究散热器几何与散热射流对机舱风速仪测量结果的影响,并不讨论机舱风速仪测量结果随风轮叶片旋转的周期性变化,因此本文主要采用定常计算,转静交界的数据传递采用转子冻结法(Frozen Rotor)。转子冻结法将转动部件固定在一定位置,通过坐标系的旋转考虑叶片旋转速度的影响。为了评估叶片位置对风速分布的影响,本文进行非定常计算,采用瞬态转静交接法(transition rotor-stator)进行数据传递。旋转一周设置72个物理时间步。收敛曲线稳定后计算5周,对最后5周结果进行时间平均。

## 2 计算结果分析

本文主要研究散热器及散热器射流对机舱风速的影响,因此主要对时均结果和典型叶片位置的定常结果进行详细分析,不讨论叶片对机舱风速的周期性影响。

### 2.1 速度廓线

首先对机舱风速仪位置处的风速分布廓线进行分析。图4给出了机舱上方在风速仪位置处的风速沿高度方向的分布,该处机舱上表面的相对高度为2.7 m。上三角表示机舱上方无散热器,且叶片位于 $0^\circ$ 相位角时的速度分布,即一只叶片恰位于机舱上游;下三角表示无散热器,且叶片位于 $60^\circ$ 相位角时的速度分布。此时2只叶片位于机舱的两侧各 $60^\circ$ 位置。比较2条曲线可以看出,叶片位于机舱上游时,受叶片圆柱段尾流的影响,机舱风速较小,且边界层较厚,约为1.7 m。叶片的影响一直延伸到7 m高度以上。叶片位于机舱两侧时,对机舱风速影响较小。边界层厚度相对较薄,仅约为0.6 m。但由于两侧叶片的狭管效应,最大速度较来流速度有所增大。图中的圆圈表示有散热器,但无散热射流(即散热器不工作)时的速度分布。由于散热器的阻碍作用,散热器下游的风速进一步减小,形成很大的速度梯度,边界层厚度进一步增加,其影响范围达到4.8 m高度。再之上的速度分布与无散热器的速度分布重合。在风速仪高度处,与无散热器的速度有0.8 m/s的差别。方块表示在后表面有散热射流(即散热器工作)时的速度分布。由于射流的存在,在靠近机舱表面附近的风速明显增大,形成反向的速度梯度,一定程度上削弱了散热器对机舱流动的干扰。与无射流的分布相比,射流的影响范围达到4.2 m高度。在风速仪高度处,与无散热器的风速有0.3 m/s的差别。

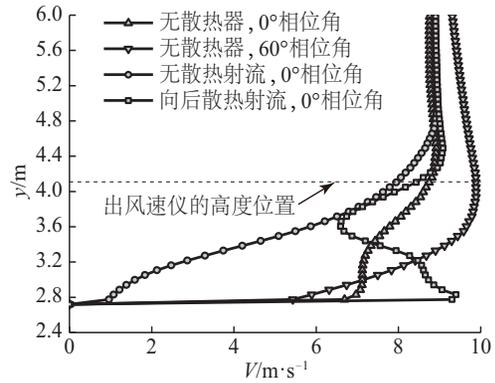


图4 定常计算的风速仪位置处速度廓线

Fig. 4 Velocity profile at anemometer position using steady simulations

图5所示为非定常计算旋转一周的平均风速分布廓线,其图例含义与图4相同。从时均结果来看,散热器的阻碍作用使机舱壁面附近的风速减小,而射流使机舱壁面附近的风速又明显增加。散热器几何的影响范围在3.2 m高度以内,散热射流的影响范围在3.8 m高度以内,均小于风速仪高度。在4.4~5.5 m高度之间,存在射流时的风速与无散热器的风速也存在微小差别。风速在5.5 m高度附近恢复到来流速度;高于此高度,已经脱离圆柱段范围,进入翼型段范围。随着高度的增加,翼型厚度减小,叶片吸收风能的能力增强,因此机舱风速又逐渐降低,明显小于风轮前的来流风速。因此,在机舱上方存在一定的最佳测风高度。对于本文所研究的机组叶片,其最佳高度在约4.4 m。

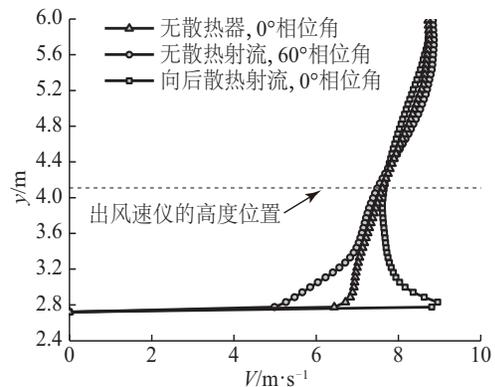


图5 时间平均的风速仪位置处速度廓线

Fig. 5 Time averaged velocity profile at anemometer position

将图5的时均结果与图4中 $0^\circ$ 相位角定常计算结果相比,散热器及散热射流的影响范围均有所减小,边

边界厚度增加,但边界层内的速度梯度减小。这是由于 $0^\circ$ 相位角时,叶片位于机舱上游。叶片根部的圆柱段在后表面会产生流动分离,形成交替脱落的脱落涡,在散热器附近形成低速区。

## 2.2 流场分布

图 6 显示了机舱中截面上的时均速度云图。如图 6a 所示,无散热器时,机舱顶部附近的风速略低于来流风速,但无明显的低速区。有散热器而无散热射流时,如图 6b 所示,由于散热器的后台阶作用,在散热器下游形成分离流动,在散热器与风速仪中间的位置发生再附。分离流动产生的低速区延伸到机舱尾部,机舱后部上方的风速略有降低。当散热器工作时,如图 6c,散

热器后表面产生射流,沿机舱表面向后流动,延伸到机舱尾部。机舱后部上方的风速也较图 6a 略有上升。其结果与图 5 速度曲线一致。

图 7 给出了在风速仪高度处水平截面的时均速度分布。黑色虚线显示机舱的轮廓。由图可见,无散热器时,机舱后部几乎完全位于低速区中,明显低于机舱两侧的风速。低速区主要由风轮近尾迹产生,向风轮旋转方向偏斜。有散热器但无射流时,如图 7b 所示,低速区收窄。机舱两侧壁已位于低速区之外。散热器工作时,如图 7c,低速区进一步收窄,其偏斜程度也明显减弱。因此,风速仪宜布置于机舱展向两侧位置。散热器与散热射流一定程度上改善了近尾流影响,减小了由于尾流偏斜引起的风向的测量误差。

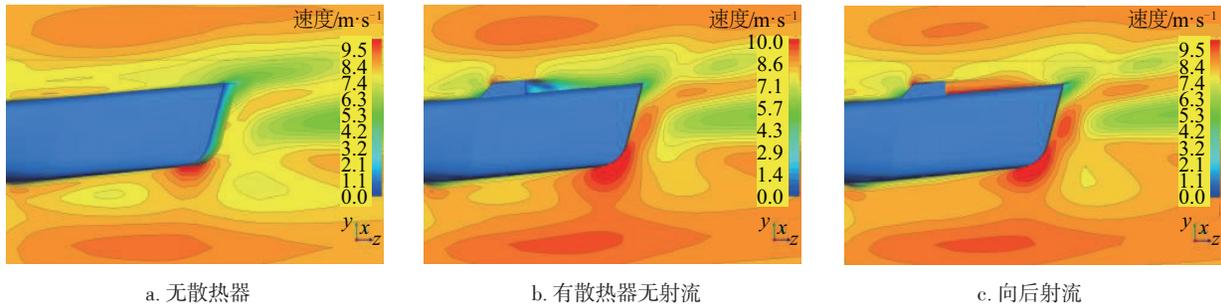


图 6 中截面的时均速度云图

Fig. 6 Time-averaged velocity contours on middle section

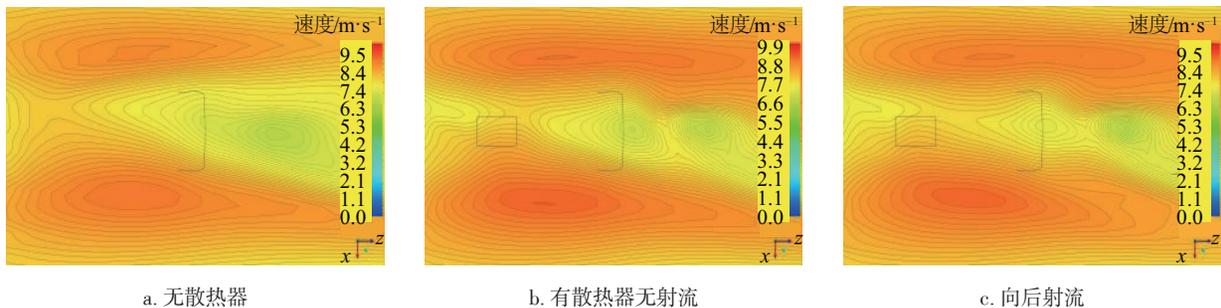


图 7 风速仪高度处水平截面时均速度云图

Fig. 7 Contours of time-averaged velocity at anemometer height

图 8 所示为叶片在 $0^\circ$ 相位角时定常计算结果的速度分布云图。由图 8a 看出,无散热器时,在机舱的前部形成一个低速的尾流区。在尾流区下游,风速接近主流区的速度。加装散热器后,在散热器的阻挡作用下,低速区消失。但在散热器的顶部级产生分离流动,分离区一直延伸到机舱尾部,其高度明显高于风速仪高度。因此风速仪的安装高度应高于此高度。这也是图 4 中圆点曲线在近壁面产生较大速度梯度的原因。在

图 8c 中,由于射流的存在,散热器下游的分离区消失。同时,射流改变了散热器顶部的逆压梯度,散热器顶部的分离流动也消失,在散热器前的角区形成漩涡,在射流与主流之间形成一个较薄的低速区,其高度略低于风速仪高度。这也是图 4 中方块曲线在 3.6 m 高度附近形成速度低谷的原因。在散热器工作时,风速仪的安装位置应不高于此高度。

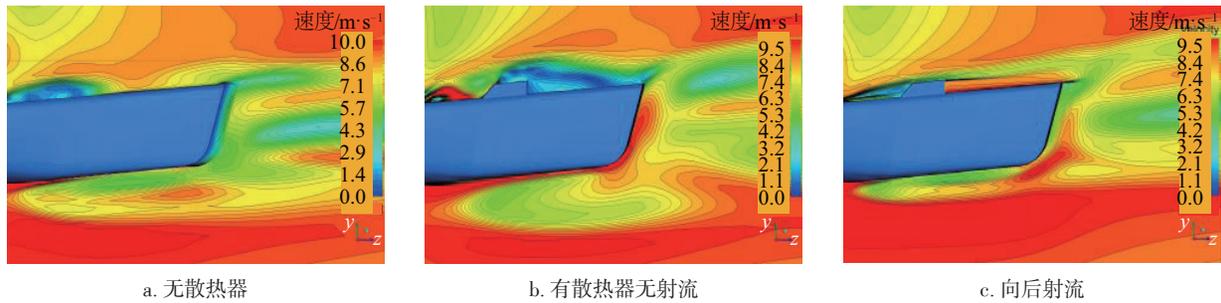


图8 定常计算的中截面速度云图

Fig. 8 Velocity contours of steady results on middle section

### 3 结 论

本文采用 CFD 模拟对某大型水平轴风电机组机舱顶部散热对机舱风速的影响进行研究,获得如下主要结论:

1)散热器不工作时,散热器下游形成的低速区使机舱风速仪测得的风速偏低。散热器工作时,散热射流使机舱近壁面的风速偏大,在一定程度上减弱了散热器几何的影响。

2)风速仪的高度存在一定的最优区间,低于此区间,风速受散热器和散热射流的影响明显,高于此区间则受到叶片翼型段的影响。

3)本文所研究的散热器对风速仪高度处的时均风速影响较小,但对典型叶片位置时风速仪高度处的风速有一定影响。

#### [参考文献]

- [1] IEC. IEC 61400-12-2 Wind turbines-part 12-2: power performance measurements of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry[S]. Switzerland: IEC, 2013: 31-34.
- [2] VINAY B K, FRANK O, KURT S H. Alternative approach for establishing the nacelle transfer function [J]. Wind engineering, 2016, 40(4): 307-318.
- [3] ORMEL F. Advanced nacelle anemometry and SCADA-data, analysis techniques and limitations [C]//EWEA Technology Workshop on Analysis of Operating Wind Farms, Lyon, France, 2012.
- [4] MASSON C, SMAÏLI A. Numerical study of turbulent flow around a wind turbine nacelle [J]. Wind energy, 2006, 9(3): 281-298.
- [5] AMEUR K, MASSON C, EECEN P J. 2d and 3d numerical simulation of the wind-rotor/nacelle interaction in an atmospheric boundary layer[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2011, 99: 833-844.
- [6] AMEUR K, MASSON C. Effect of wind turbine rotor modelling on nacelle anemometry [J]. Wind engineering, 2013, 37(6): 617-636.
- [7] ROLF E K. A numerical investigation of nacelle anemometry for a HAWT using actuator disk and line models in CFD [J]. Renewable energy, 2012, 48: 72-84.
- [8] FREDERIK Z, NIELS N S. Characterization of the unsteady flow in the nacelle region of a modern wind turbine[J]. Wind energy, 2011, 14(2): 271-283.
- [9] 李杰, 赵萍, 戚中浩, 等. 风力机叶片旋转对测风仪的影响[J]. 东方汽轮机, 2012(1): 20-25.  
LI J, ZHAO P, QI Z H, et al. The effect of rotating wind turbine blade to anemometer [J]. Dongfang turbine, 2012(1): 20-25.
- [10] 莫蕊瑜, 张凯, 陶友传. 风电机组旋转风轮对机舱测风影响的分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(1): 56-60.  
MO R Y, ZHANG K, TAO Y C. The analysis of rotating blades effect on wind turbines nacelle wind measurement [J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(1): 56-60.
- [11] 戚中浩, 赵萍, 李杰, 等. 2 MW 风力发电机组机舱外流场分析[J]. 东方汽轮机, 2012(3): 12-15.  
QI Z H, ZHAO PG, LI J, et al. Analysis of the flow field around the nacelle of 2 MW wind turbine [J]. Dongfang turbine, 2012(3): 12-15.
- [12] 范忠瑶, 康顺, 王建录. 风力机叶片三维数值计算方法确认研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 279-285.  
FAN Z Y, KANG S, WANG J L. The validate and research on 3D numerical simulation of the aerodynamic performance of wind turbine blades [J]. Acta energiae solaris sinica, 2010, 31(3): 279-285.

## NUMERICAL INVESTIGATIONS OF INFLUENCE OF HEAT DISSIPATION HOLE JET ON NACELLE WIND SPEED

Wu Genyong<sup>1,3</sup>, Chen Chengcheng<sup>2,3</sup>, Wang Xiaodong<sup>4</sup>, Ding Lin<sup>4</sup>, Ye Zhaoliang<sup>4</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Windey Co., Ltd, Hangzhou 310012, China; 3. State Key Laboratory of Wind Power System, Hangzhou 310012, China;

4. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, Ministry of Education,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This paper investigates the flow structure around the nacelle of a 2 MW wind turbine. The influence of the heat jets issued from the heat dissipation holes on the local flow around the nacelle is analyzed. The effect of the heat jets to the nacelle wind speed are also evaluated. The simulation results show that there exists optimal installation height of the anemometer. The heat dissipater and their jets have small influence on the average wind speed at the anemometer position. However, the heat dissipater has obvious influence on the wind speed if the blade is on some certain positions. The emission jets reduce this influence in a certain extent.

**Keywords:** wind turbines; wakes; anemometers; heat dissipater; numerical simulations