

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.010

数值仿真技术在风力发电机机舱散热设计中的应用研究^{*}

陈成城^{1,2}, 程晨光¹, 吴根勇^{1,2}, 应 有^{1,2,3}

(1. 浙江运达风电股份有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 风力发电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310012;
3. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为解决风力发电机组机舱内空气流动不合理及局部温度过高的问题,将数值仿真技术应用到风力发电机组机舱散热设计中。开展了机舱内热源散热形式和流动特性的分析,建立了简化的三维物理模型,提出了结合计算流体力学和热力学对系统进行数值仿真的方法,在 CFD 软件上对不同物理模型的散热性能进行了评价。研究结果表明,原模型机舱内空气流动不合理,核心区域无法得到冷却,导致局部区域温度过高;优化后模型对入口空气流量进行了重新分配,增大了核心区域冷却空气的流量和流速,同时实现了机舱整体温度的降低。

关键词:风力发电;机舱散热设计;数值仿真;空气流动;温度场

中图分类号:TH122;TP24;TM614

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)04-0430-04

Application of numerical simulation in thermal design of wind turbine nacelle

CHEN Cheng-cheng^{1,2}, CHENG Chen-guang¹, WU Gen-yong^{1,2}, YING You^{1,2,3}

(1. Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. State Key Laboratory of Wind Power System, Hangzhou 310012, China;

3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of unsatisfactory air flowed and high temperature of local part inside the wind turbine nacelle, the numerical simulation technique was investigated. After the analysis of heat source and flow characteristics, the simplified 3 dimensional model was established. And then, a method was presented to process the numerical simulation, which based on the computational fluid dynamic and thermodynamics. The cooling performance of different models was evaluated by CFD software. The result indicates that the original model has defective which causes poor cooling performance at high-temperature zone; the optimization model gives new flow distribution, it causes the increase of air flux and velocity at the core zone, the overall temperature of nacelle decreases as well.

Key words: wind power generation; nacelle thermal design; numerical simulation; air flow; temperature filed

0 引 言

目前发电机组散热设计主要依靠各个部件供应商对各自部件的冷却设计,这样的设计只能保证各个部件在独立运行情况下的散热要求。然而,当所有部件集中在一个相对密闭空间,整合成一个系统运行时,相

互间的影响及对所处空间的热量传递是整机设计中缺少的^[1]。国内对风力发电机组散热研究处于起步阶段,如周年勇^[2]提出了海上风机机舱的热平衡设计方法,刘海涛^[3]进行了海上双馈机组的散热布置优化研究,元伟伟^[4]开展了 MW 级风力发电机组冷却系统研究。

收稿日期:2015-11-09

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAA06B01)

作者简介:陈成城(1990-),男,浙江温州人,硕士研究生,主要从事风力发电系统流体仿真方面的研究. E-mail: chencc@chinawindey.com

机舱内散热设计主要有3种方法:简化公式法、等效热路法和物理场数值模拟法^[5-7]。简化公式法利用简化的牛顿散热公式计算平均温升,该方法简单但精度低。等效热路法根据热力学和电路理论将各热量损耗转换成等效的热阻,形成一个复杂的热网络,该方法工作量巨大,且易带入人为误差。物理场数值模拟法利用计算机求解质量守恒、动量守恒和能量守恒方程,可较快地获得空间速度场、压力场及温度场分布。

数值仿真技术在风电行业已经应用多年,是大型风电机组研发、设计必备的核心技术之一^[8]。该技术在风电零部件生产、设计厂家中应用较广泛,如发动机、齿轮箱、变流器等部件在进行冷却设计时。然而,机舱散热设计主要还是使用简化公式法,之后在样机测试中对设计进行评测,这样的流程历时长且经济性差。数值仿真技术能够在设计阶段就用于对设计方案进行验证,快速获得不同方案的优劣,大大减少了研发成本及时间。同时数值仿真基于高性能计算机求解,能够用于获得空间内详细的温度场及流体场,发现空气流动死角及热量堆积区域,为技术人员在做散热设计及解决实际遇到散热问题时提供针对性的指导。

本研究对某MW级机组机舱进行热源分析,之后利用Fluent建立该机组机舱的简化数值计算模型。笔者通过对原模型中机舱内空气的温度场与流场的详细分析,发现原始设计在散热设计上的不足,优化模型以使散热性能上有较大的提升。

1 机舱内热源及空气进出口分析

MW级机组机舱内主要发热部件为齿轮箱、发电机和控制柜。虽然齿轮箱、发电机都有相配套的冷却系统将热量传递到机舱外,但仍有部分热量不可避免地通过部件表面传递到机舱的空气中,尤其在夏季舱外空气温度较高情况下,造成机舱内热负荷加剧。齿轮箱在运转中,必然会有一定的功率损失,损失的功率将转换为热量,使齿轮箱的油温上升。一部分热量通过冷却系统的热量交换传递到舱外,即 Q_{GB1} ;另一部分通过部件表面传递到机舱内,即 Q_{GB2} 。

发电机在工作过程中也会产生大量的热,其内部的各种损耗是电机发热的内在因素,主要包括以下几大类:铁损耗,铜损耗,励磁损耗,机械损耗。与齿轮箱类似,发电机的部分热量通过冷却系统的热量交换传递到舱外,为 Q_{G1} ;另一部分通过部件表面传递到机舱内,为 Q_{G2} 。相对于发电机和齿轮箱,控制柜的发热量小很多,直接与机舱内空气进行热交换,所有热量散发

到机舱内,为 Q_c 。

在边界条件上,机舱可看作单出口,多入口的流道系统,内部结构较为复杂,发电机组模型如图1所示。机舱尾部的轴流风扇为整个系统空气流动的动力来源,多个开放性入口,塔筒底部入口inlet1、塔筒间隙入口inlet2、机舱前端入口inlet3。基于数值仿真的结果,提出了优化方案:在机舱中段底部设置一新进风口。

具体位置如图1所示(下文中,原模型与优化模型分别命名为Case1和Case2)。

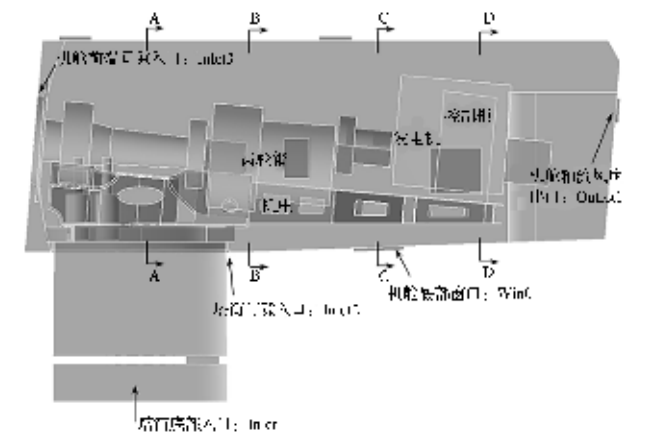


图1 发电机组模型

边界条件设置情况如表1所示。

表1 边界条件设置

类别	位置	边界条件
入口设置	Win0	压力入口,P1 (Case1关闭;Case2打开)
	Inlet1	压力入口,P2
	Inlet2	压力入口,P3
	Inlet3	压力入口,P4
出口设置	Outlet	速度出口,v1
	发电机	散热面,T1
热源设置	齿轮箱	散热面,T2
	控制柜	热源,Qc

2 数值仿真

2.1 基本方程

机舱内流体满足质量守恒、动量守恒定律和能量守恒定律^[9-10]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \tag{1}$$

当流动处于稳态且流体为均质不可压缩时,密度 ρ 为常数,方程可写成:

$$\text{div}(\rho u) = 0 \tag{2}$$

当流体的流动伴随着热能交换时,必须满足能量

守恒定律,流体粒子的能量增长率等于传递给流体粒子的净热量加上作用在流体粒子上的总功。可获得能量守恒方程:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{u} T)=\operatorname{div}\left(\frac{k}{c} \operatorname{grad} T\right)+\frac{S}{c} \quad(3)$$

式中: ρ —流体密度, $\mathrm{kg} / \mathrm{m}^3$; t —时间, s ; k —导热系数, $\mathrm{W} /(\mathrm{m} \cdot \mathrm{K})$; $\mathbf{u}$ —速度向量, m / s ; T —温度, K ; c —比热容, $\mathrm{J} /(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K})$; S —容积发热率, $\mathrm{J} / \mathrm{m}^3$ 。

2.2 数值仿真计算设置

研究机舱内空气的稳定状态,因而求解方程不含时间项,选用稳态分析。机舱外为稳定大气环境,压强 1 atm,温度 30 ℃。入口给定压力入口,出口给定速度出口。发电机和齿轮箱为表面温度热载荷,温度数值参考实际测试数据。控制柜设定为发热源载荷,数值为控制柜总发热量。以上边界条件设定均参考机组已达到热平衡状态下测试数据。

机舱尺寸: $L \times W \times H=12 \mathrm{~m} \times 4 \mathrm{~m} \times 4 \mathrm{~m}$ 。全局采用非结构化网格划分,在热源表面添加边界层。给定全局网格尺寸、面网格尺寸及 First Layer Thickness 和 Growth Rate 边界层设置来控制不同区域网格密度。

网格生成如图 2 所示。

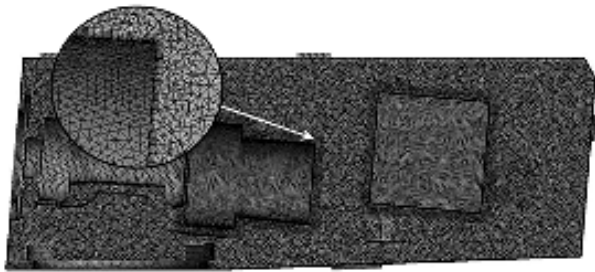


图 2 网格生成图

针对数值仿真可靠性进行了网格无关性和湍流模型适应性分析,最终选定网格总数约 6.5×10^6 ,湍流模型为 k-epsilon。采用 36 核 128 G 内存计算机进行求解,使用求解软件为 Fluent。

3 结果分析

3.1 速度场分析

机舱内部空气流动的迹线图如图 3 所示。

由图 3 可看出,空气主要从塔筒进入机舱,另有一部分空气从塔筒间隙进入,之后由尾部轴流风扇排出机舱。空气流动主要集中在机舱的顶部和底部,轨迹如图中虚线所示。机舱中部由于齿轮箱、发电机等部件的阻隔,导致该区域的空气流动较弱,形成了一个流动停滞区。同时由于机舱座的分割,底部的气流也无法进入到“齿轮箱、发电机区域”。

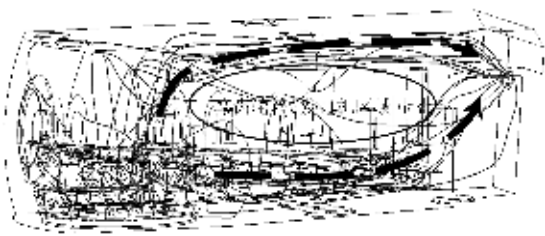


图 3 机舱内空气流动迹线

示舱内选定 4 个平面的速度图如图 4 所示(具体位置参考图 1)。

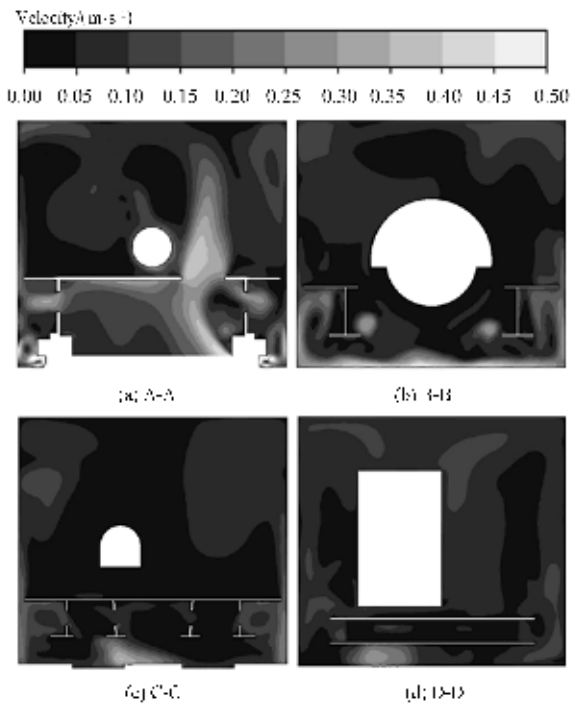


图 4 平面速度图

由图 4 中可看出,舱内空气流动较差:在平面 A-A 上,气流从塔筒和塔筒间隙进入机舱,出现了一些流速较高的区域。在平面 B-B 和 C-C,只有贴近底部的少量区域流速仍保持较高,中间区域显示流速低(对应“齿轮箱、发电机区域”),机舱座呈现较明显的分割效果,使气流无法流通。平面 D-D 的位置较靠近机舱尾部的轴流风扇,整个平面上显示有流速分布,但数值较小,流动并不强烈。

3.2 温度场分析

空间温度场如图 5 所示。

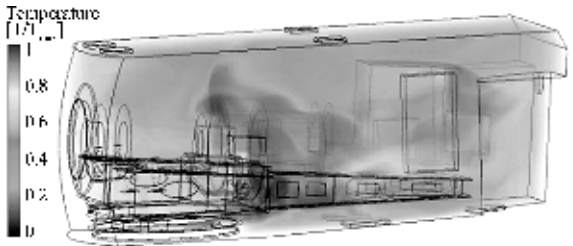


图 5 空间温度场分布

齿轮箱和发电机作为机舱内主要的发热源,其产生的热量一部分通过自带散热器传递到机舱外,另一部分通过表面传递到机舱内的空气中。主要冷却气流从塔筒进入机舱,因此显示机舱前端温度较低,黑色的高温区域主要集中在齿轮箱和发电机周围,与图3中“齿轮箱、发电机区域”相对应。由于该区域空气流动停滞,热量无法被及时带走,进而在该区域累积,成为影响机组正常运行的隐患。

3.3 通风优化方案分析

通过对图3和图4的讨论可以看出由于舱内复杂的结构,空气在齿轮箱、发电机区域流动微弱,无法起到足够的散热效果。基于上述讨论,本研究针对机舱的散热设计提出了优化方案,在机舱底部增加一个进风口。优化前后机舱内空气速度矢量图如图6所示。

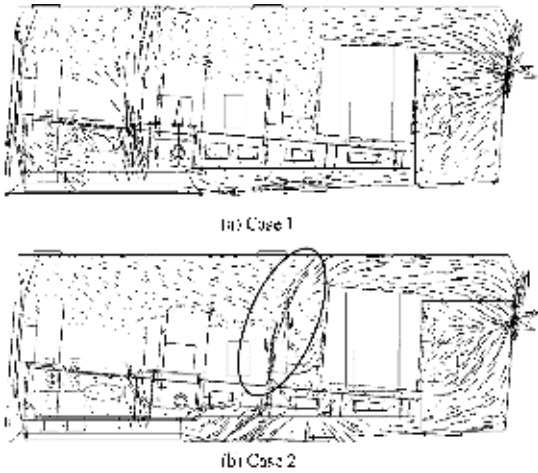


图6 平面速度矢量图

对比图6(b)和图6(a)可以发现,气流从底部窗口进入机舱,带动机舱座周围空气流动。机舱内空气流动特性发生变化:从机舱前端过来的气流,沿机舱顶部流动;另一气流从机舱底部向上流动,穿过“齿轮箱、发电机区域”,如图中标记所示。两条气流汇合流向机舱尾部轴流风扇,由尾部轴流风扇排出。

Case 1和Case 2入口流量对比如表2所示,数值以相对于总流量比例的形式给出。在Case 2中,由塔筒(Inlet1)进入机舱的气流减少,转而从机舱底部窗口(Win0)进入机舱。从机舱底部窗口进入的气流直接作用在“齿轮箱、发电机区域”,起到了较好的冷却效果。

本研究选取如图7所示的机舱对称平面上温度场分布来进行散热效果说明。在图7(b)中,发电机、齿轮箱周围温度场有所改善,发热源周围的红色区域减

小,尤其是齿轮箱的下方。在齿轮箱下方,结构较复杂,原模型中冷却气流很难到达,形成热量堆积区。Case 2模型机舱底部窗口打开,现成一个新的进风口,致使机舱底部的空气流动加速。由图7(a),7(b)的A-A剖面温度场对比可看出优化方案对机舱座下方温度分布有一个明显的改善,整个区域呈现温度较低的黑色。

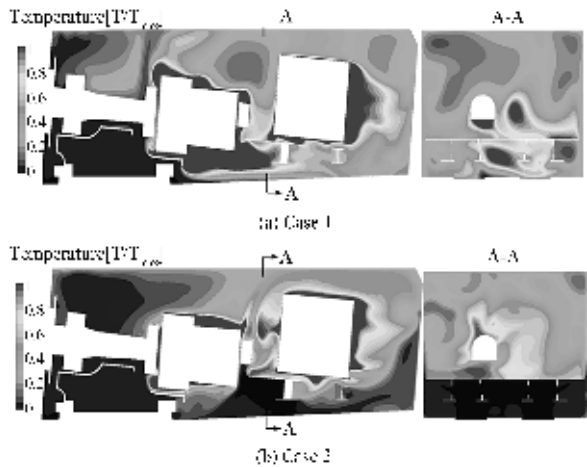


图7 平面温度场分布

表2 各进出口空气流量比例[Q/Q_{outlet}]					
	Win0	Inlet1	Inlet2	Inlet3	Outlet
Case 1	0	0.464	0.369	0.167	1
Case 2	0.631	0.179	0.107	0.083	1

4 结束语

基于高性能计算机的数值仿真可较好的模拟机舱内温度场及流体场的分布,仿真结果直观、详细地反映出热量累计区域及空气流动特征,为风力发电机组的热平衡设计及实际工程中遇到的散热问题提供很好的理论支持。同时,通过对不同设计方案的仿真计算,能够快速获得方案对比效果,并且能够给出理论设计无法获悉的空间上的温度及流速的变化特征,为实际工程设计大大减少了时间和经济成本。

本研究基于数值仿真技术给出了风力发电机组机舱温度场及流体场分布的特性。通过对原模型的分析可看出,机舱内空气流动不合理,无法对核心区域进行冷却,导致该区域温度较高;基于以上结果对模型的通风方案进行优化,结果显示流动有了一个较明显的改善,整体温度降低,很好的验证了优化方案的有效性。

后续研究将对数值仿真方法进行优化,进一步完善仿真准确性及应用性。并将对本研究进行实验验证。

(下转第457页)