

文章编号: 1007-2861(2009)03-0301-05

风墙聚能风力机的三维数值模拟及优化

李玉翔, 黄典贵

(上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

摘要: 风能是一种洁净的可再生能源, 对风能的开发已受到广泛的重视. 采用商用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT, 对风墙聚能风力机进行三维数值模拟. 计算在相同来流条件下, 不同尺寸和形状的风墙中风力机的聚能增益比, 由此来寻求风墙的尺寸和形状对风机聚能的影响规律. 对于影响风机聚能效果的参数采用正交优化方法进行分析 and 优化, 得出风墙形状对聚能效果的影响规律, 为风墙聚能风力机的试验和建造提供了依据.

关键词: 风力机; 聚能增益; 计算流体力学; 数值模拟

中图分类号: O 351

文献标志码: A

Numerical Simulation and Optimization of Walls Used in Augmented Wind Turbines

LI Yu-xiang, HUANG Dian-gui

(Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Wind energy is a clean and renewable energy, and much attention is being attracted to the use of wind energy. In this paper, a 3D model of wall augmented wind turbine is established. Numerical simulation is carried out by using a computational fluid dynamics (CFD) software FLUENT. With the same upstream wind speed, the ratio of augmentation benefit of the wind turbine in different sizes and shapes of walls are calculated. Influence of the wall on the augmentation effect and its laws are acquired. The augmentation effects are then analyzed and optimized using the orthogonal method, and the rule of the augmentation effect of the wind walls obtained. The simulation study provides a reference for the experiment and construction of the wall augmented wind turbine.

Key words: wind turbine; wind augmentation; computational fluid dynamics (CFD); numerical simulation

风能作为一种无污染、可再生的能源, 受到了世界各国的普遍重视. 如何提高风能利用率、增加风力发电机的输出功率一直是风能利用的关键.

风力机的输出功率为

$$P = \frac{\pi}{8} \rho D^2 V^3 C_p, \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度, D 为风轮直径, V 为风轮平面的风速, C_p 为功率系数.

可以看出, 在其他条件不变的情况下, 功率 P 和风

收稿日期: 2008-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50836006)

通信作者: 黄典贵(1963~), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为叶轮机械. E-mail: dg Huang@mail. etp. ac. cn

轮平面的风速 V 的立方成正比,增加风轮处的风速能够有效地增加风力机的输出功率.通过增加风速以达到提高风力机输出功率的装置称为风力聚能装置.

一直以来,人们都在研究各种各样的风力聚能装置.早在20世纪50年代,就有科学家提出过扩散器风力聚能装置的设想,其中比较著名的有我国科学家钱学森提出的一种风力扩散放大器^[1],这种装置被称为 Diffuser Augmented Wind Turbine(DAWT).在70年代末期,Gilbert 和 Foreman 第一次尝试用试验的方法研究风力聚能装置的实际效果^[2].系统地开展风力机扩散器理论研究的学者是 Van Holtan.后来 DAWT 理论又被 Van Bussel 和 Martens 所论证^[3].此外,国内外的一些学者也开展了一些数值计算方面的研究,其中有 D. G. Philips^[4,5] 和汪建文^[6,7]等.

对于大型的风力发电装置而言,扩散器装置并不合适,原因是不易建造和安装.于是出现了利用建筑物来代替扩散器装置的想法,称之为 Building-Augmented Wind Turbine(BAWT).如何利用建筑物更好地聚集风能是其中的关键.国外有科学家提出了很多新颖的设计概念并通过试验来检验其效果^[8].

挡风墙聚能风力机装置属于 BAWT 的一种,通过在大型风力机外侧建造两堵墙体,形成一个类似于扩散放大器的装置,能够有效地提高风轮平面的过风速度,达到增加风力机输出功率的目的.

1 风墙聚能风力机的建模与计算

1.1 模型的几何参数

根据以往的研究成果,采用流线型墙体的聚能风墙能够达到较好的聚能效果^[7].模型的几何平面图如图1所示.风墙的几何形状对其聚能效果有着很大的影响,其中包括风墙的进口和出口面积、风力机前段风墙和后段风墙的长度、风墙的高度以及风墙喉部的尺寸.这几个因素分别由图1中所示的几何参数来确定:风墙前段圆弧的半径 R_1 和后端圆弧半径 R_2 (半径的增大将导致进出口面积的减小)、风墙前段的直线长度 L_1 和后段直线长度 L_2 、风墙与风力机风轮外侧之间的间隙长度 A 以及风墙的高度.

1.2 模拟采用的数值计算方法

Standard $k-\varepsilon$ 模型是典型的两方程模型,它是在一方程模型的基础上,新引入一个关于湍流耗散率标准 ε 的方程后形成的.自1972年Launder和Spalding^[10]提出该湍流模型以来,该模型在科学研究及工程实际中得到了很广泛的检验和成功应用.

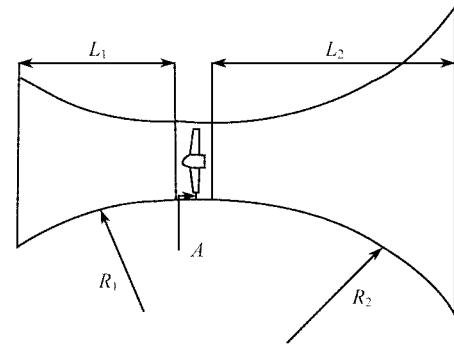


图1 风墙的几何平面示意图

Fig.1 Geometry view of the wind wall

此湍流模型在各种风力机数值模拟方面的应用和研究也十分广泛,得到了工程应用的认可^[5].

本研究采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,运用 Segregated 隐式求解器,求解三维时均雷诺 N-S 方程(RANS),各种变量和湍流粘性参数采用二阶迎风格式离散,压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法.计算常温常压下的低速流动,不考虑风墙的厚度和温度传热等影响,可简化为不可压稳态非传热问题.

稳态不可压缩流动三维定常雷诺时均 N-S 方程(RANS)包括:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}), \quad (3)$$

式中, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$.

标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10]为

$$u_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + \frac{1}{\rho} G_k - \varepsilon, \quad (4)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k + \frac{1}{\rho} \cdot$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

式中, G_k 是湍流动能 k 的生成项, $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \right)$.

$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$. 模型常数 $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$,

$C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

1.3 计算区域及网格划分

前处理工作的质量直接影响数值模拟的质量和

可靠性,其中网格品质的好坏直接影响到数值解的计算精度.一般来说,网格数量增加,计算精度也会随之增加,但同时计算规模也会增大.所以在确定网格数目时要综合权衡两个因素.在进行实际问题的模拟时,要经过反复调试和比较,才能获得适合于具体问题计算的网格.为了达到较为准确的解,网格节点的数目要求足够大,直到随着网格数目的增加,计算结果不再有显著变化为止,在此基础上,尽量减少网格数量以减少计算量,提高收敛的稳定性;在梯度大的地方,网格需要足够细密;尽量减小网格单元的倾斜度以及梯度小的地方的网格数.在本研究的模拟过程中,常遇到迭代多次计算仍不收敛的问题,通过调整和优化网格后予以解决.

本研究的整个模型计算区域包括风力机全场.内部流场分为风墙内部和风墙外部两个区域,风力机模型又位于风墙内部,所以整个计算区域较大,需要在保证计算精度的情况下尽可能地节省计算资源.由于风墙以及风力机的存在破坏了整个计算区域,不易产生结构化网格,网格划分也分为内部和外部两个区域.内部区域由于风机的存在,形状较为复杂,采用非结构四面体网格划分.考虑到内部区域是主要计算区域,且由于边界层效应,靠近壁面的网格需要细化,所以内部网格划分较密;外部区域则采用六面体结构化网格划分,网格划分较为稀疏.由内部细密的网格划分逐渐变化到外部稀疏的网格划分,既能保证计算精度,也能有效地减少计算量.经过精心策划和反复计算比较后的网格划分数量在90万~100万之间.网格生成以后,对网格的质量(EquiAngle Skew)进行检查,质量范围在0.2~0.6之间的网格占到85%以上,说明生成的网格质量符合一般计算要求.模型和网格的划分如图2所示.

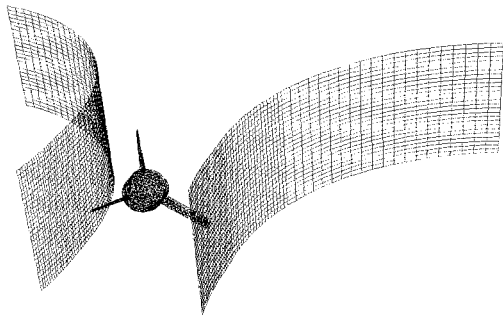


图2 风墙聚能风力机的三维网格图

Fig. 2 3D mesh grid of the wind wall augmented tubine

1.4 边界条件的设定

计算区域的进口边界设置为速度进口边界条件,给定风速大小为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,流动方向为轴向进气.出口边界设置为压力出口边界条件,给定初始压力为大气静压力,其他参数由内部外推.外部边界设置为压力远场边界条件,给定静压为大气压力,速度为风速,模拟真实大气的自由边界.此种边界条件的设定符合一般三维风机流场的实际情况,通过与实验的对比计算结果误差也能够达到令人满意的程度^[11].

1.5 计算结果的正交分析处理

一个算例完成计算后,得到的流场平面速度云图如图3所示.可以很明显地看出,风墙内部的空气流速较风墙外部大,风墙的聚能增速作用比较明显.风墙内的静压与风墙外的静压相比要小,由此产生抽吸作用使得通过风墙内的流量及风速增大.

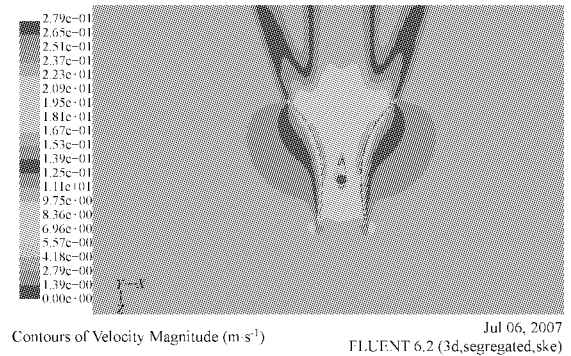


图3 带风墙的风力机的流场速度云图

Fig. 3 Velocity isolines of the wind around the turbine with wind walls

风墙具有明显的聚能增速的作用,不仅如此,风墙的各种几何参数的改变能够影响其聚能增速效果.为了找出这些几何参数的变化对风墙聚能效果的影响变化规律,引入正交试验优化方法.正交试验法,是指运用正交表安排试验方案和进行结果分析的一种试验设计方法.由于正交表是根据均衡分布思想,运用组合数学理论构造的一种数学表格,具有正交性、典型性以及综合可比性等优点,适用于多因素、多指标且具有随机误差的试验.通过正交试验,可以分析各因素对试验指标的影响,按其重要程度找出主次关系,并确定试验指标的优选工艺条件.

为方便可记为

$$\lambda = \frac{w'}{w}, \quad (6)$$

式中, w' 为加了风墙后的风力机发电功率, w 为无风墙的风力机发电功率, n 为风轮转速, M 为风轮所受到的扭矩大小, λ 为风能聚能增益比.

按照正交试验优化设计当中的定义, 参照模型的平面示意图和尺寸说明, 本问题共有 6 个参数. 每个参数给出 5 个不同的数值以测试其对聚能增益比的影响效果和规律, 设计出计算工况的 6 因素 5 水平的正交表^[9], 其中风墙各几何参数的变化通过与风力机风轮半径的比值变化来反映, 建立的模型中 $r = 2.5$ m, 各个工况及其相应的聚能增益比 λ 如表 1 所示.

表 1 不同工况聚能增益比值表

Table 1 Augmentation ratio of different walls

工况号	R_1	R_2	L_1	L_2	A	H	λ
1	$5r$	$5r$	$0.8r$	$0.8r$	$0.10r$	$1.2r$	1.103
2	$5r$	$7r$	$1.6r$	$1.6r$	$0.15r$	$1.5r$	1.201
3	$5r$	$9r$	$2.4r$	$2.4r$	$0.20r$	$1.8r$	1.359
4	$5r$	$11r$	$3.2r$	$3.2r$	$0.25r$	$2.1r$	1.378
5	$5r$	$13r$	$4.0r$	$4.0r$	$0.30r$	$2.4r$	1.541
6	$7r$	$5r$	$1.6r$	$2.4r$	$0.25r$	$2.4r$	1.645
7	$7r$	$7r$	$2.4r$	$3.2r$	$0.30r$	$1.2r$	1.244
8	$7r$	$9r$	$3.2r$	$4.0r$	$0.10r$	$1.5r$	1.344
9	$7r$	$11r$	$4.0r$	$0.8r$	$0.15r$	$1.8r$	1.036
10	$7r$	$13r$	$0.8r$	$1.6r$	$0.20r$	$2.1r$	1.076
11	$9r$	$5r$	$2.4r$	$4.0r$	$0.15r$	$2.1r$	2.086
12	$9r$	$7r$	$3.2r$	$0.8r$	$0.20r$	$2.4r$	1.104
13	$9r$	$9r$	$4.0r$	$1.6r$	$0.25r$	$1.2r$	1.093
14	$9r$	$11r$	$0.8r$	$2.4r$	$0.30r$	$1.5r$	1.126
15	$9r$	$13r$	$1.6r$	$3.2r$	$0.10r$	$1.8r$	1.254
16	$11r$	$5r$	$3.2r$	$1.6r$	$0.30r$	$1.8r$	1.272
17	$11r$	$7r$	$4.0r$	$2.4r$	$0.10r$	$2.1r$	1.447
18	$11r$	$9r$	$0.8r$	$3.2r$	$0.15r$	$2.4r$	1.520
19	$11r$	$11r$	$1.6r$	$4.0r$	$0.20r$	$1.2r$	1.151
20	$11r$	$13r$	$2.4r$	$0.8r$	$0.25r$	$1.5r$	1.045
21	$13r$	$5r$	$4.0r$	$3.2r$	$0.20r$	$1.5r$	1.551
22	$13r$	$7r$	$0.8r$	$4.0r$	$0.25r$	$1.8r$	1.524
23	$13r$	$9r$	$1.6r$	$0.8r$	$0.30r$	$2.1r$	1.087
24	$13r$	$11r$	$2.4r$	$1.6r$	$0.10r$	$2.4r$	1.241
25	$13r$	$13r$	$3.2r$	$2.4r$	$0.15r$	$1.2r$	1.110

在 25 个工况的计算结果出来之后, 利用正交优化方法中的统计方法计算出各不同工况的平均聚能增益比 $\bar{\lambda}$ ^[9], 列于表 2 中.

表 2 聚能增益比 λ 的统计分析表

Table 2 Statistics analyzes result of augmentation ratio λ

因素	R_1	R_2	L_1	L_2	A	H
$\bar{\lambda}_1$	1.316	1.531	1.270	1.075	1.278	1.140
$\bar{\lambda}_2$	1.269	1.304	1.268	1.177	1.391	1.253
$\bar{\lambda}_3$	1.332	1.281	1.395	1.337	1.248	1.289
$\bar{\lambda}_4$	1.287	1.186	1.242	1.389	1.337	1.415
$\bar{\lambda}_5$	1.303	1.205	1.334	1.529	1.254	1.410

表 2 中, $\bar{\lambda}_1$ 在 R_1 列中的数值代表 $R_1 = 5r$ 时, 计算不同工况下得到的平均聚能增益比, 同理, 其他各行各列的数值也依此方法计算^[9]. 由此表可以得到单个因素变化时, 聚能增益比的变化规律, 也能对比不同因素变化对聚能增益比所产生的影响大小.

1.6 结果分析

风墙的几何参数变化时, 聚能增益比也会发生变化, 风墙各个部位的尺寸对风墙聚能效果的影响规律分析如下:

(1) 当 R_2 减小, 即风墙的出口面积增大时, 聚能增益比值增大, 说明风墙的聚能效果随着风墙出口面积的增大而增大;

(2) 当 L_2 增大时, 聚能增益比值增大, 说明风墙的聚能效果随着风墙长度的增加而增大;

(3) 当 H 增大时, 聚能增益比也呈增大趋势, 但当风墙高度增加到一定高度之后, 达到峰值, 之后稍微降低. 可以看到在 $H = 2.1r$ 时, 聚能增益比达到最大, 说明风墙的高度有最佳值;

(4) 风墙前段尺寸 R_1 和 L_1 以及风墙与风机间隙 A 的大小对聚能增速的影响是次要的, 在这些因素的变化过程中, 风墙聚能增益比值变化由于受到其他主要因素的影响干扰, 呈现出一定波动性.

在实际的风墙设计优化过程中, 可以优先考虑设计对聚能增益比影响较大的风墙后段的尺寸和形状以及风墙的高度等主要因素, 其他次要因素可以不做主要设计参数; 且考虑到风墙的实际建造可行性, 风墙后端的长度和宽度需要在一定程度上受到限制.

2 结 论

(1) 风墙聚能风力机的模拟计算结果分析表

明,在风力机外部建造风墙确实能够起到聚能增速的作用,有效地增加风机的输出功率,起到增加发电量的作用.优化过的风墙,聚能效果更佳.

(2) 对于风力机聚能风墙的应用性和经济性,需要考虑多方面的实际因素.不仅要考虑到它的聚能增速效果和由此带来的风力机输出功率的净增加量,还要综合考虑风墙的实际建造尺寸,风墙的建造成本以及风墙聚能装置地理和气象等多方面因素,才能使风墙聚能风力机装置达到其最佳效果.

(3) 聚能风力发电装置对于风场内的风向及风速有一定的要求,如果风向不够稳定,那么聚能风力发电装置的聚能增速作用将不能得到完全发挥.聚能型风力机风墙一般只适用于在常年风向变化范围不大的地区应用,风墙的入口应该和常年风速方向垂直,使得聚能的作用得到充分的发挥.我国部分风能资源丰富的地区具备推广此聚能型风力机风墙技术的气候条件.

参考文献:

- [1] 辛士红,汪建文. 形形色色的风力机[J]. 能源技术, 2004,25(6):275-276.
- [2] GILBERT B L, FOREMAN K M. Experiments with a diffuser-augmented model wind turbine [J]. Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASM, 1983, 105(3):46-53.
- [3] VAN BUSSEL G J W. An assessment of the performance of diffuser augmented wind turbines (DAWT'S) [C] // Proc 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference FEDSM99-780, San Francisco. 1999.
- [4] PHILIPS D G, NASH T A, OAKEV A, et al. Computational fluid dynamic and wind tunnel modeling of a diffuser augmented wind turbine [J]. Wind Engineering, 1999, 23(1):7-13.
- [5] PHILIPS D G, RICHARDS P J, FLAY R G J. CFD modeling and the development of the diffuser augmented wind turbine [J]. Wind and Structures, 2002, 5(2):267-276.
- [6] WANG J W, SUN K, XIN S H, et al. Numerical simulation of inside flow field and wind tunnel experiment of diffuser augmented wind turbines [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 33(12):27-40.
- [7] 汪建文,孙科,贾瑞博. 风力机扩散放大器流场的数值仿真[J]. 能源技术,2004,25(5):185-187.
- [8] BLANCH M J. Wind Energy Technologies for use in the Built Environment [J]. Wind Engineering, 2002, 26(3):125-143.
- [9] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001:24-55.
- [10] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [M]. London: Academic Press, 1972:100-301.
- [11] 贾瑞博. 风力机叶尖加小翼动力放大的数值模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2005:27.

(编辑:赵宇)