

文章编号:1007-6735(2013)03-0270-05

基于 CFD 的复杂地形风能分布研究

李辰奇¹, 许 昌¹, 杨建川¹, 甄文忠², 刘德有¹, 郑 源¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 南京 211100; 2. 丹麦科技大学 风能系, 林格比 2800)

摘要: 提出一种通过计算流体力学(CFD)计算风电场风速和风能分布的方法,该方法通过 Argis 软件对风电场 CAD 等高线图进行离散处理,按照风速玫瑰图分布,利用 Fluent 软件对复杂地形条件下风场按照 12 分度进行数值计算,并按照风速风向分布概率由 Tecplot 软件进行后处理,得到整个风场的风速分布特点和风能分布.将计算结果与 WAsP 软件作比较,结合地形特点进行分析,认为本文计算方法得到的结论较为可靠.

关键词: 风电场; 复杂地形; 风能资源评估; CFD 数值模拟

中图分类号: TM 344.1 **文献标志码:** A

Prediction of Wind Energy Distribution in Complex Terrain Using CFD

LI Chen-qi¹, XU Chang¹, YANG Jian-chuan¹, ZHEN Wen-zhong², LIU De-you¹, ZHENG Yuan¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, Lyngby 2800, Denmark)

Abstract: Numerical simulations were carried out by using the Fluent software with a mesh generated by using the Argis software to predict the wind speed distribution in complex terrain. The post-processing by Tecplot was used to get the wind speed distribution characteristics and the wind energy distribution in the whole wind field. The obtained results were compared to the calculated results with WAsP software.

Key words: *wind farm; complex terrain; wind energy resources evaluation; computational fluid dynamics numerical simulation*

近年来,风电能源成为发展速度最快的可再生能源^[1-3],风能资源评估是建设风电场的基础性工作,发电量计算结果直接关系到风电场的经济指标和整体效益.目前风能资源评估和发电量计算基本上采用丹麦 Riso 实验室开发的 WAsP 软件,该软件采用线性模型对风能资源和风能产量进行评估,对

收稿日期: 2012-10-21
基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2012-940);国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2010CB227102);中央高校基本科研业务费项目(2009B19414)
第一作者: 李辰奇(1988-),男,硕士研究生.研究方向:流体机械及工程. E-mail: lichenqi19881123@163.com
通讯作者: 许 昌(1973-),男,副教授.研究方向:从事风力发电和太阳能发电研究. E-mail: zhuifengxu@163.com

于平坦地形条件,预测精度较高,而对于复杂地形条件,预测精度有待于进一步提高^[4-8].随着风能资源开发的不断深入,风电场规划选址开始从风能稳定、施工条件好的平坦地形向高湍流、施工难度大的复杂地形发展^[9-11].这样,以 WAsP 为计算引擎的风能资源评估软件不适合处理复杂地形的风资源情况.

目前我国已有学者开展针对复杂地形的风资源预测的研究工作,但其研究水平与国外有一定差距,主要体现在地形数据的处理、风电场空气动力场的数值计算方法和空气动力场数值计算结果的处理上^[12-16].本文尝试开展适用于复杂地形风资源评估的小尺度非线性数值模式研究,采用近年来快速发展的计算流体力学(CFD)技术,计算分析风电场风速和风能分布,并与 WAsP 软件的计算结果进行比较,并定性定量分析本文方法的可靠性.

1 地形数字化

目前风电场复杂地形通常是通过 AutoCAD 等高线方式表示,而通过 CFD 技术计算风电场空气动力场,需要建立包括地形在内的物理模型,物理模型的建立首先需要对复杂地形进行数字化. Argis 是一款集地理信息系统开发、分析、地图数字化、地理信息的采集等功能于一体的软件,目前在地理信息系统行业该软件的功能最为强大,应用最为广泛.本文实例中,使用 Argis 将 AutoCAD 中的等高线分离出来生成 tin 文件,从而得到转化成坐标点的 dem 文件,对 dem 文件进行离散处理,风电场等高线如图 1 所示,而在 Argis 离散处理后地形如图 2 所示.通过图形的对比分析,认为 Argis 软件离散后的地形图基本达到了原等高线图的精度要求.

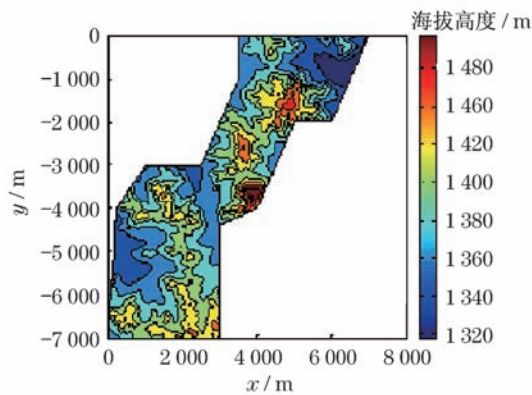


图1 风电场等高线图

Fig.1 Wind farm contour map

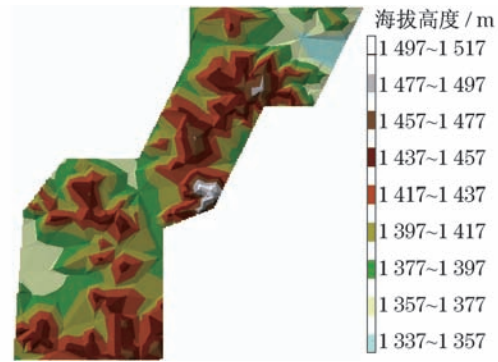


图2 Argis 地形显示图

Fig.2 Argis mapping

根据复杂地形离散后的数字文件,在 gambit 中建立地形物理模型.根据地形资料,选取的计算区域为 $7\,000\text{ m} \times 7\,000\text{ m} \times 500\text{ m}$,如图 3 所示.其中,高度为 500 m ,选择非结构网格,地面面网格为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,垂直方向上网格将地表到 500 m 高度分为 3 层,分别为 $0 \sim 50\text{ m}$, $50 \sim 200\text{ m}$, $200 \sim 500\text{ m}$,而网格间隔分别为 $5, 10, 30\text{ m}$.

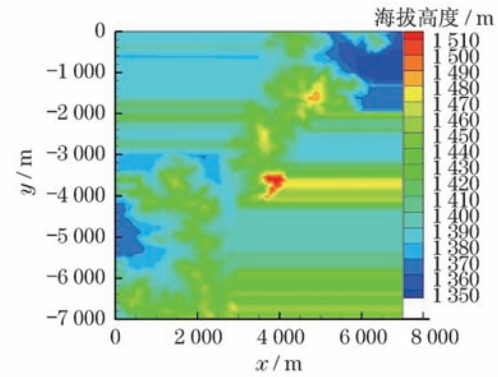


图3 风场地形计算区域

Fig.3 Wind farm calculation area

2 数学模型和求解

流体动力学标准的 Navier-Stokes 方程组(直角坐标系)为^[17]

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

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

本文选用稳态、常物性控制方程.选用的标准

κ - ϵ 湍流模型^[18]为

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \text{div}(\rho \kappa \mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma_{\kappa} \text{grad } \kappa) + G - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma_{\epsilon} \text{grad } \epsilon) + \frac{C_{1\epsilon}}{\kappa} G - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为绝对速度; ρ 为空气密度; u, v 为水平风速; w 为垂直风速; p 为空气压强; μ 为动力粘度; κ 为湍流动能; ϵ 为湍动耗散率; Γ_{κ} 为 κ 的扩散系数; G 为紊流能量的生成率, 也是动能的耗散率; $G - \rho \epsilon$ 为方程的净源项; $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 为模型常数.

方程求解采用二阶上风方法离散, 底面边界条件是壁面函数, 入口为给定的速度入口, 出口为给定的出流口, 而其它的面采用对称条件. 风速按照 12 分度的风向玫瑰图, 计算出每个分区的平均风速, 在垂直地面方向采用的模型为

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (7)$$

式中, u_* 为表面摩擦速度系数; K 为 Karman 常数, 一般取 0.4; z_0 为地表面粗糙度长度.

该模型通过 Fluent 的 UDF 编辑实现. 其中, $0 \sim 30^\circ$ 风向的入口速度输入如图 4 所示, 可以看出, 速度进口沿着高度方向的变化趋势, 地面风速接近为零, 随着高度的增加, 根据网格划分的情况, 出现层状的颜色分布.

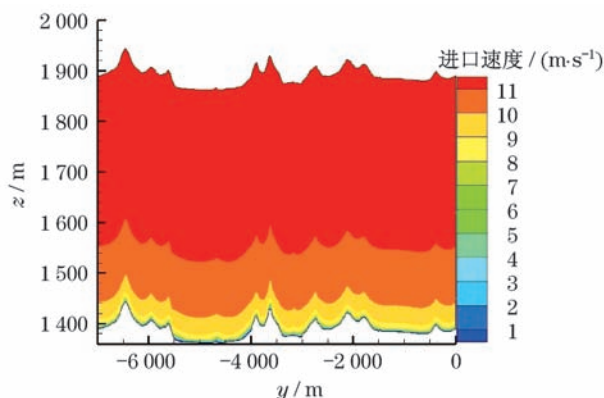


图 4 $0 \sim 30^\circ$ 方向速度进口局部图
Fig.4 $0 \sim 30^\circ$ speed import local map

3 结果分析

3.1 风能计算结果

风能密度是气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能^[19]. 从而风功率密度公式, 也称风能密度公式为

$$W = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (8)$$

式中, W 为风功率; V 为给定位置的风速大小.

通过计算, 在 Fluent 软件中得到 12 个方向上的风速分布, 将这些风速在 Tecplot 中按照风速概率分布拟合, 计算出风电场中的风能分布.

在图 5(a) 中, 风能随着离地高度的增加也逐渐增加, 风能已经在 $300 \sim 600 \text{ W/m}^2$ 之间, 也可以看出风速主风向的趋势, 大概是在 45° 左右. 在图 5(b) 和图 5(c) 中, 风能分布趋势已大致稳定, 反映出海拔高度变化平缓的区域风速梯度变化小, 海拔高度

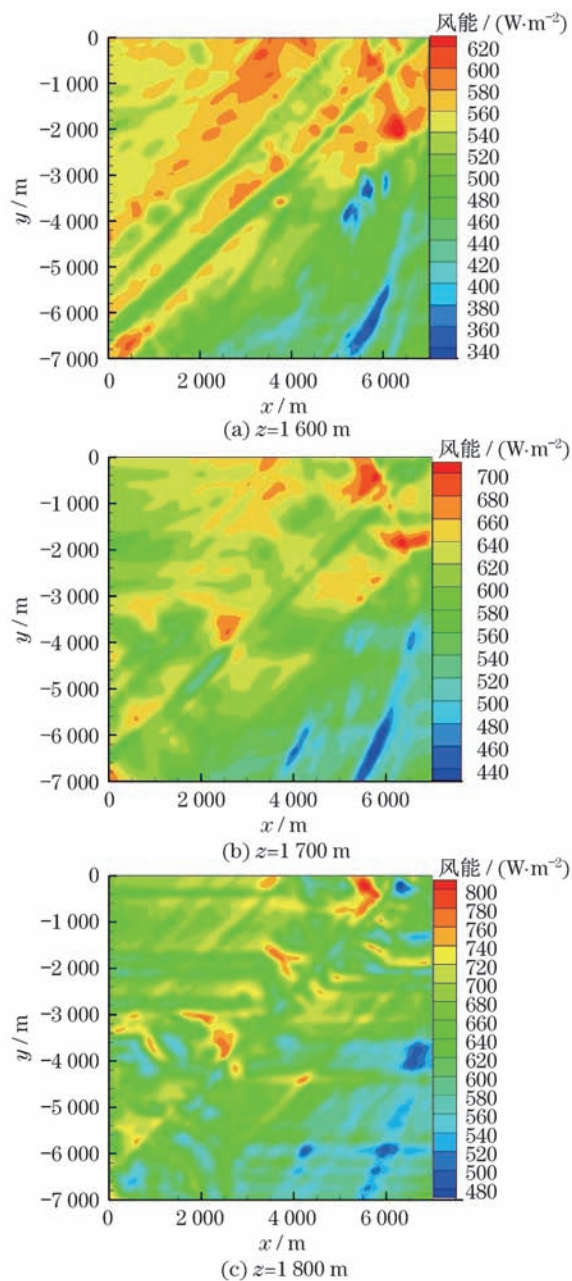


图 5 风能分布

Fig.5 Distribution of wind energy

变化差异大的区域风速梯度变化大. 图 6 和图 7 是

在地形图的位置 $y = -3\,000\text{ m}$, $x = 2\,500 \sim 5\,000\text{ m}$ 范围内的某一山坡下的风能分布图和速度分布图. 其中,图 6 是将 12 个风向上的风速综合而成,图 7 是在 $0\sim 30^\circ$ 风向上从右往左吹过山坡. 从图 7 中可以看出,迎风坡的风速比背风坡的风速大,这是因为受到山坡的阻碍,风受到削减,能量损失,造成风速减小.

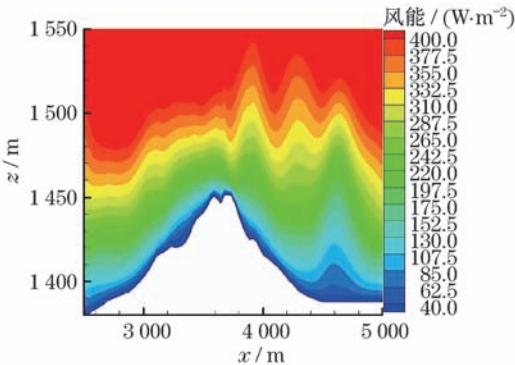


图 6 $z = 1\,700\text{ m}$ 风能分布
Fig.6 Distribution of wind energy at $z = 1\,700\text{ m}$

3.2 数值模拟与 WAsP 软件进行比较

在地图上,沿着主风向,取地图对角线上均匀分布的20个点为参考点,通过CFD数值模拟方法和

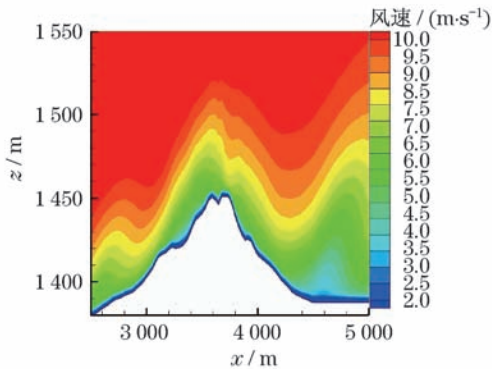


图 7 $z = 1\,800\text{ m}$ 风速分布
Fig.7 Distribution of wind energy at $z = 1\,600\text{ m}$

WAsP 软件方法,分别计算这些点的风能大小. 可以看到,CFD 计算得到的点的风能大小变化很大,而 WAsP 得到的风能大小变化范围较小,这主要是因为 WAsP 只考虑到高度对风速的影响,而忽略了复杂地形下地形对风的削减改变也有很强的作用,而 CFD 数值模拟方法将地形对风速风能的影响也考虑在内,从而得到了更符合实际的风能分布结果. 从表 1 中可以看出,第 6 点开始到第 20 个点,CFD 比 WAsP 的结果要小 $100\sim 200\text{ W/m}^2$, 而前面 5 个点可能靠近地形的边缘,结果差的变化范围较

表 1 CFD 与 WAsP 在 20 个计算点的风能分布
Tab.1 Distribution of wind energy at 20 calculation points by using CFD and WAsP

计算点	x/m	y/m	z/m	CFD 计算风能 $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	WAsP 计算风能 $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	两种方法风能差 $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1	150.862 1	-6 849.14	1 428.775	352.079 8	378.307 6	26.227 8
2	452.586 2	-6 547.41	1 487.500	568.931 0	432.972 5	-135.958 5
3	754.310 3	-6 245.69	1 459.047	394.090 8	412.591 2	18.500 4
4	1 056.034	-5 943.97	1 415.502	214.513 6	354.060 9	139.547 3
5	1 357.759	-5 642.24	1 428.367	319.951 4	377.684 8	57.733 4
6	1 659.483	-5 340.52	1 419.449	215.235 6	362.272 0	147.036 4
7	1 961.207	-5 038.79	1 447.859	270.951 6	402.066 1	131.114 5
8	2 262.931	-4 737.07	1 434.054	195.264 6	385.851 2	190.586 6
9	2 564.655	-4 435.34	1 438.466	246.808 9	391.518 2	144.709 3
10	2 866.379	-4 133.62	1 419.913	149.063 3	363.172 4	214.109 1
11	3 168.103	-3 831.90	1 435.779	163.185 9	388.129 6	224.943 7
12	3 469.828	-3 530.17	1 480.485	271.241 6	428.591 0	157.349 4
13	3 771.552	-3 228.45	1 455.358	220.321 9	409.324 9	189.003 0
14	4 073.276	-2 926.72	1 452.328	235.105 8	406.498 6	171.392 8
15	4 375.000	-2 625.00	1 441.018	205.414 6	394.571 1	189.156 5
16	4 676.724	-2 323.28	1 459.547	265.273 2	413.020 1	147.746 9
17	4 978.448	-2 021.55	1 482.582	293.811 4	429.937 5	136.126 1
18	5 280.172	-1 719.83	1 477.500	316.996 1	426.616 5	109.620 4
19	5 581.897	-1 418.10	1 433.579	194.879 3	385.208 8	190.329 5
20	5 883.621	-1 116.38	1 415.281	254.554 4	353.569 2	99.014 8

大.从图8可以直观地看到,只有第2个计算点的CFD计算风能分布大于WAsP的计算结果,其它计算点都是WAsP计算结果比CFD结果大,这也与目前复杂地形利用WAsP计算结果偏大的结果吻合.表1是CFD与WAsP在20个计算点的风能分布.

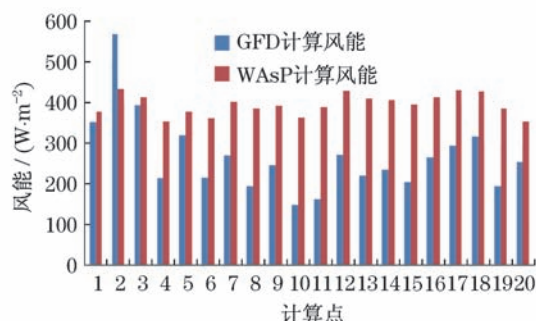


图8 WAsP与CFD计算20个点的风能图
Fig.8 Wind energy diagram at 20 calculation points by using CFD and WAsP

4 结论

a. 在复杂地形下,将CFD计算方法与WAsP软件计算得到的风能分布相比较,CFD计算方法更客观、更接近实际地反映出风经过复杂地形下的风能分布,同时考虑到了山坡等障碍物对风的削弱,而不仅仅局限于高度要素的影响.

b. 由于传统风资源评估软件WAsP对复杂地形计算误差较大,通常偏大,本文采用CFD数值模拟计算方法,考虑了复杂地形和高度对风速变化的影响,计算结果比WAsP结果小,这与目前复杂地形利用WAsP计算结果偏大的结果吻合.

参考文献:

[1] 韩春福. 风能资源评估方法的分析及应用[J]. 节能, 2009, 32(5): 22-24.
[2] 胡毅, 张健. 风资源评估中风速方法研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2010, 233(21): 76-78.
[3] 梁思超, 张晓东, 康顺, 等. 基于数值模拟的复杂地形风场风资源评估方法[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(3): 415-421.
[4] Okulov V I, Sorensen J N. Instability of a vortex wake behind wind turbines[J]. Doklady Physics, 2004, 49(12): 772-777.

[5] Johansen J, Sorensen N N. Aerofoil characteristics from 3D CFD rotor computations[J]. Wind Energy, 2004, 7(4): 283-294.
[6] 赖永伦, 巫卿. WAsP软件在贵州四格风电场风资源评估中的应用分析[J]. 红水河, 2009, 28(4): 106-108.
[7] 杨振斌, 薛桁, 桑建国. 复杂地形风能资源评估研究初探[J]. 太阳能学报, 2004, 25(6): 744-749.
[8] Yang X Y, Xiao Y, Chen S Y. Wind speed and generated power forecasting in wind farm [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(11): 1-2.
[9] Berge E, Nyhammer F, Tallhaug L, et al. An evaluation of the WAsP model at a coastal mountainous site in Norway[J]. Wind Energy, 2006, 9(1): 131-140.
[10] 王远成, 吴文权. 不同形状建筑物周围风环境的研究[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(1): 19-23.
[11] Kusiak A, Zheng H Y. Optimization of wind turbine energy and power factor with an evolutionary computation algorithm[J]. Renewable Energy, 2010, 35(3): 1324-1332.
[12] 冯长青, 杜燕军, 包紫光, 等. 风能资源评估软件WAsP和WT的适用性[J]. 中国电力, 2010, 43(1): 61-65.
[13] Madsen H A, Larsen G C, Larsen T J. Validation of the dynamic wake meandering model for implementation in an aeroelastic code [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2010, 132(4): 41-71.
[14] Berg J, Mann J, Bechmann A. The bolund experiment, Part I: Flow over a steep, three-dimensional hill[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 141(2): 219.
[15] Bingol F, Mann J, Foussekis D. Conically scanning lidar error in complex terrain [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2009, 18(2): 189-196.
[16] Kindler D, Oldroyd A, MacAskill A, et al. An eight month test campaign of the QinetiQ ZephIR system: preliminary results [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2007, 16(5): 479-480.
[17] 王美琳, 罗勇, 周荣卫. WindSim软件在复杂地形风电场风能资源评估中的应用[J]. 气象, 2010, 36(2): 113-119.
[18] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[19] 田子婵, 杨勇平, 刘永前. 复杂地形的风资源评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.

(编辑: 石 璞)