

风电场山坡地形的数值模拟研究

左 薇¹, 李惠民¹, 芮晓明², 王晓东², 康 顺^{2,3}

(1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120;

2. 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; 3. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065)

摘 要: 以典型复杂地形山坡的三维模型为研究对象,采用CFD数值模拟方法并选用SST湍流模型研究均匀来流条件下,坡度为15°、30°和45°时山坡周围流体绕流特点。对比分析不同时刻坡度不同时山坡附近不同位置处的速度分布,讨论不同坡度的山坡坡顶边缘、平台和山坡后涡运动情况和湍动能变化。研究表明,15°和30°的山坡坡顶风速品质较好,可考虑安装风力机;为了避免山坡后流体的强湍流流动,导致的风力机和塔架的振动,应将风力机安装在距山坡10H(H为山坡高度)后;山坡一侧可获得较好的风能,若在此处安装风力机可适当降低风力机的高度。

关键词: 典型复杂地形; 山坡; 三维; 数值模拟

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

风能利用是一种颇有前景的技术,世界上很多地区风能能够提供部分必需的能源^[1,2]。风力发电是将风能通过风力机风轮转化为机械能,再通过发电机转换为电能的能源生产过程。近年来,随着风电行业发展的深入,世界各国逐步加大对风电场建设的投入,许多风电项目开始关注复杂地形和海上。风电场选择复杂地形,应考虑利用地形起伏变化产生的地面效应,如:风速较大的山顶、山口等位置^[3]。风电场建设在海上,与平坦地形类似,考虑来流风速大、湍流度低^[4]且不占用陆地面积,然而海上风电建设存在相当大的困难和诸多问题。实际工程项目中更多地倾向于将风电场建设在复杂地形上。

国内外的研究人员采用不同方法对复杂地形进行相关研究,取得了很大进步,可为今后开展研究工作提供参考^[5-8]。随着计算机的发展和计算方法的不断改进,CFD数值模拟方法广泛应用于解决各类工业问题,可较好地再现流体绕流复杂几何的流动状况,越来越多地应用于研究复杂地形的流动问题。Bechmann等^[9]系统比较了从简单的线性模型到最先进的大涡模拟等所有类型的模拟方法,且

均用于Bolound岛的盲评测试。研究发现两方程的RANS模拟方法可在较短的时间内得出最好的计算结果。Churchfield等^[10-12]采用CFD方法数值模拟Horn Rev和Lillgrund风电场,结果表明CFD数值模拟方法可实现复杂地形乃至极度陡峭地形的风场模拟。魏慧荣等^[13]采用CFD数值模拟方法研究风场中实际地形的风流动模拟,阐述不同网格和不同湍流模型对漩涡位置和速度分布的影响。李磊等^[14]采用CFD软件模拟复杂地形的风场,讨论复杂地形计算模型的建立,网格的不同生成方式,以及不同的湍流模型对计算结果的影响。沈晶等^[15]针对掌握复杂地形区域内的风能分布对风电场微观选址有重要作用的问题,采用CFD软件数值模拟峡谷地形中风流动规律。但对于一些典型复杂地形,比如:山坡、山丘、山脊等方面的研究工作目前还处于起步阶段,需从物理现象出发更详细地分析非定常粘性绕流的细节。

为了更深入探究复杂地形对风流动的影响,本文选择典型复杂地形山坡为研究对象,采用CFD数值模拟方法研究地形附近风流动特点,比较不同坡度的地形附近流体绕流的情况,为工程实际提供有力参考。以三维模型为研究对象,研究均匀来流条件下,坡度为15°、30°和45°时山坡周围流体绕流的情况。对比分析不同时刻坡度不同时山坡附近不

同位置处的速度分布,讨论不同坡度的山坡坡顶边缘、平台和山坡后涡运动情况和湍动能的变化。

1 研究模型

山坡是指山峰和山脚之间的部分山地,是山地最重要的组成部分。如图 1 所示为山坡的剖面示意图,其中山坡的高度为 H ,坡长度为 L_1 ,坡顶平台的大小为 $L_2 \times L_2$, H 与 L_1 比值的正切函数为山坡的坡度。计算模型选取 $H=180$ m,坡度为 15° 、 30° 和 45° ,坡长 L_1 由坡度和高度控制,山坡的坡顶平台大小为 1000×1000 m²。

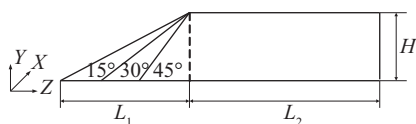


图1 山坡剖面图

Fig. 1 Section of hillside

2 数值计算方法

采用 CFD 商用软件求解非定常的雷诺时均 Navier-Stokes 方程,并选用 SST 湍流模型^[16],假设全流场为湍流流动。地形的近壁面使用壁面函数。

2.1 计算域设定

坡度为 15° 时山坡的计算域为 $3L_2 \times 6H \times (3L_1 + 4L_2)$,坡度为 30° 时山坡的计算域为 $3L_2 \times 6H \times (5L_1 + 4L_2)$,坡度为 45° 时山坡的计算域为 $3L_2 \times 6H \times (7L_1 + 4L_2)$ 。如图 2 所示, Z 轴为来流方向, Z_1 表示 $Z=0$ 处距入口边界的距离, Z_2 表示 $Z=0$ 处距出口边界的距离。坡度为 15° 的山坡 $Z_1=3L_1$,坡度为 30° 的山坡 $Z_1=5L_1$,坡度为 45° 的山坡 $Z_1=7L_1$ 。

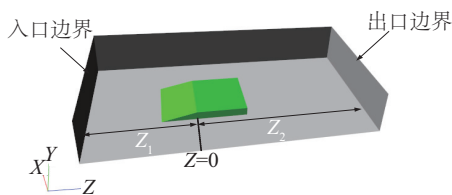


图2 计算域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of computational domain

2.2 网格划分

网格划分方式参考文献[17]。计算域的初始网格等级为 Level 0,初始网格最小尺寸为 8 m,如

图 3。对山坡地形附近的网格进行局部加密等级为 Level 1,网格最小尺寸为 4 m,如图 4 所示。

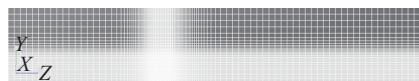


图3 计算域的初始网格

Fig. 3 Initial grids of computational domain

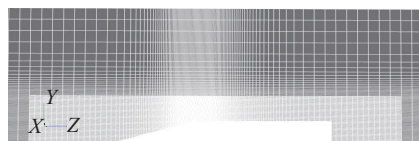


图4 地形附近加密的网格

Fig. 4 Refined grids near wind farms

2.3 边界条件

入口边界给定均匀大气温度和来流速度 11.4 m/s。地表为无滑移壁面边界条件,设置粗糙度为 0.03。计算域的其他边界为出口边界给定标准大气压。

2.4 收敛准则

非定常条件下总体性能参数达到稳定认为计算收敛。

3 数值结果与分析

坡度为 15° 、 30° 和 45° 的山坡,风流过整个计算域所需要的时间分别为 527.7、487.6 和 461.4 s,研究一个周期(T)不同时刻山丘地形流场的非定常流动现象。

3.1 速度分布

图 5 表示不同时刻 15° 的山坡不同位置的速度分布。 Z 表示来流方向, Y 表示山丘的高度方向,如图 1 所示。 $P_n(n=1, \dots, 8)$ 表示不同位置的点,点的坐标分别为 $P_1: Z=-L_1, X=0$; $P_2: Z=-1/2L_1, X=0$; $P_3: Z=0, X=0$; $P_4: Z=1/4L_2, X=0$; $P_5: Z=1/2L_2, X=0$; $P_6: Z=5H, X=0$; $P_7: Z=10H, X=0$; $P_8: Z=0, X=-1/3L_2$ 。

由图 5 可见,山坡迎风坡的坡底 P_1 位置处,不同时刻速度沿高度的变化趋势相同,速度逐渐增加,高度大于 500 m 时接近来流速度。山坡迎风坡的半山腰 P_2 位置处,不同时刻速度沿高度的变化趋

势相同,速度快速增加,高度大于 300 m 时接近来流速度。山坡的坡顶边缘 P_3 位置处,不同时刻速度的变化趋势相同,高度约为 200 m 时,速度达到最大,约为来流速度的 1.3 倍;高度约为 300 m 时,速度约为来流速度的 1.1 倍;高度大于 400 m 时,速度接近来流速度。山坡的坡顶平台 P_4 位置处和 P_5 位置处,不同时刻速度沿高度的变化趋势相同,高度约为 250 m 时,速度达到最大约为来流速度的 1.1 倍;高度大于 400 m 时,速度接近来流速度。山坡后 P_6 位置处,当 $t=1/8T\sim4/8T$,高度小于 200 m,速度沿高度的方向快速增加,高度大于 200 m,接近来流速度;当 $t=5/8T$,高度小于 300 m,速度沿高度的方向先减小后增加,高度约为 100 m,速度最小约为 0 m/s;当 $t=6/8T\sim8/8T$,速度沿高度的方向缓慢增加接近来流速度。山坡后 P_7 位置处,当 $t=1/8T\sim6/8T$,高度小于 300 m 时,速度沿高度的方向先增加后减小再增加,逐渐趋于来流速度;当 $t=7/8T$,速度沿高度方向的变化复杂,高度约为 400 m 时,速度达到最小。山坡的一侧 P_8 位置处,不同时刻速度沿高度的变化趋势相同,速度的变化

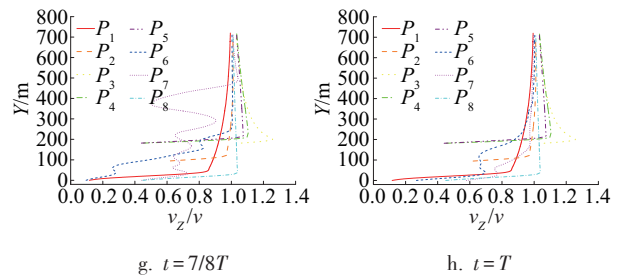
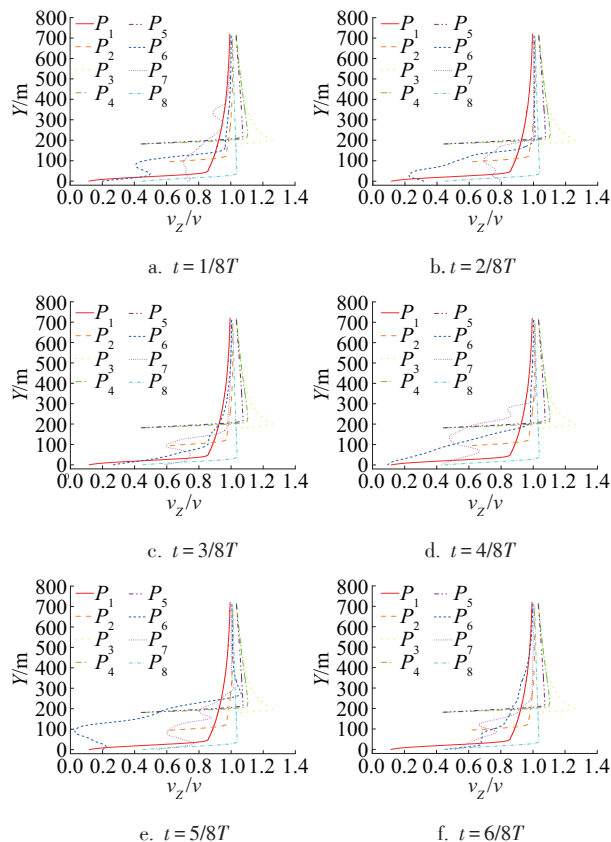


图5 坡度为15°的山坡不同位置的速度分布

Fig. 5 Velocity distribution of different location of hillside with 15°

受山坡地形的影响较小,高度约为 50 m 时,接近来流速度,此处可获得较好的风能,若在此处安装风力机可适当降低风力机的高度,降低成本及安装难度。

图 6~图 8 分别表示 $t=2/8T$ 、 $4/8T$ 和 $6/8T$ 时不同坡度的山坡不同位置的速度分布。由图可见,不同时刻不同坡度的山坡,山坡迎风坡的坡底 P_1 位置处和坡顶 P_3 位置处以及平台中间 P_5 位置处速度沿高度的变化趋势基本相同。 P_1 位置处,高度小于 300 m 时,速度沿高度的方向快速增加,相同高度坡度越小速度越大;高度大于 500 m 时,接近来流速度。 P_3 位置处,高度约为 200 m 时,速度达到最大;15°的山坡,速度约为来流速度的 1.3 倍;30°的山坡,速度约为来流速度的 1.4 倍;45°的山坡,速度约为来流速度的 1.2 倍;高度大于 400 m,速度接近来流速度。 P_5 位置处,15°和 30°的山坡速度沿高度的变化趋势相同,高度小于 200 m,速度较小,高度大于 400 m,接近来流速度;45°的山坡,高度小于 300 m,速度变化的范围较大,由于流动旋涡的存在,速度出现负值。 P_6 位置处,15°的山坡,速度沿高度的变化如前所述;30°的山坡, $t=2/8T$ 和 $4/8T$,速度沿高度的变化趋势与 15°的山坡相同, $t=6/8T$,高度小于 200 m,速度较小接近 0 m/s,高度大于 200 m,接近来流速度;45°的山坡,高度小于 500 m,速度沿高度的变化复杂,先增加后减小再增加再减小,高度大于 500 m,接近来流速度。山坡后 P_7 位置处,15°和 30°的山坡速度沿高度的变化趋势基本相同,高度小于 300 m,速度变化复杂,如前所述,高度大于 300 m,接近来流速度;45°的山坡,高度小于 500 m,速度逐渐增加,高度大于 500 m,接近来

流速度。山坡后 P_6 、 P_7 位置处,不同时刻不同坡度的山坡,速度沿高度的方向逐渐增加,最后接近来流速度。随着时间增加,速度增加幅度变大。

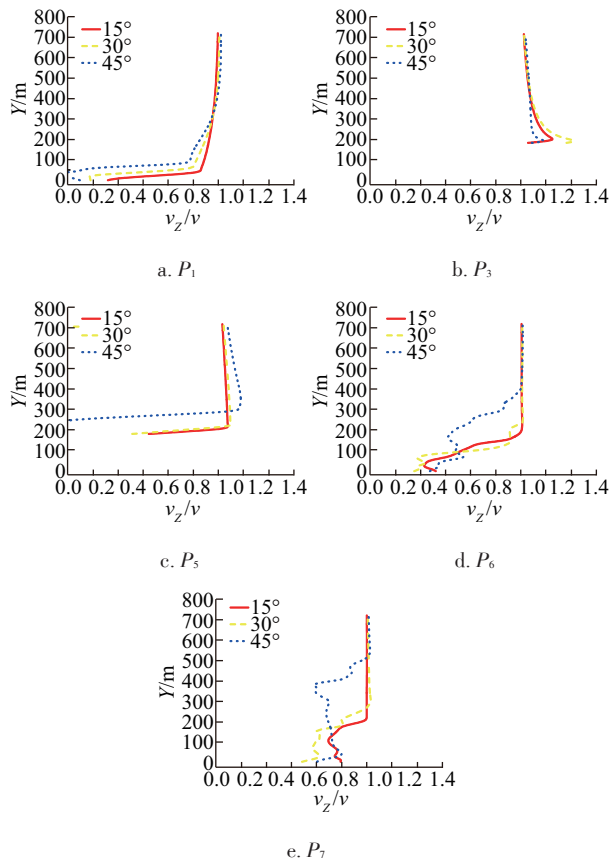


图6 不同坡度的山坡不同位置的速度分布 ($t = 2/8T$)

Fig. 6 Velocity distribution of different location of hillside with different grade ($t = 2/8T$)

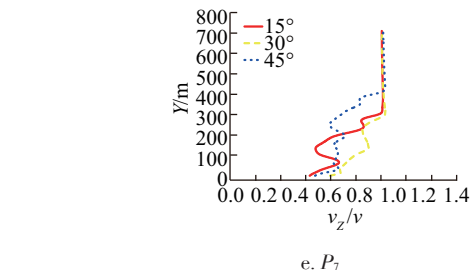
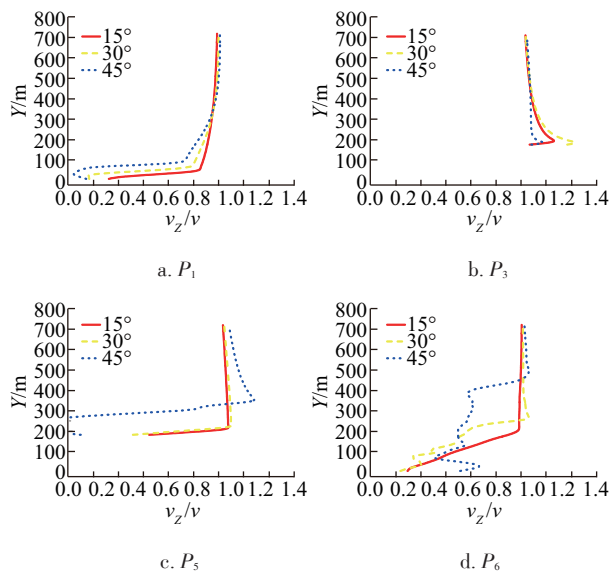


图7 不同坡度的山坡不同位置的速度分布 ($t = 4/8T$)
Fig. 7 Velocity distribution of different location of hillside with different grade ($t = 4/8T$)

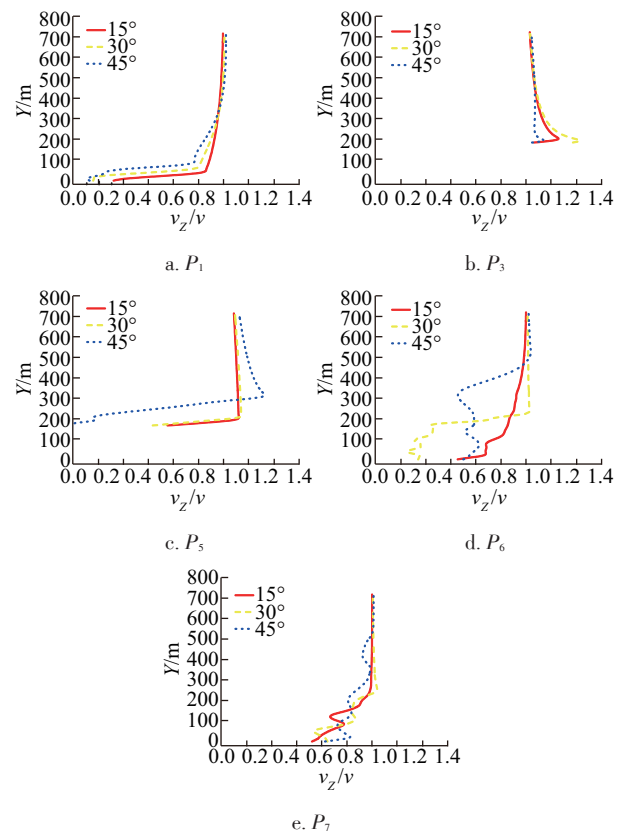


图8 不同坡度的山坡不同位置的速度分布 ($t = 6/8T$)

Fig. 8 Velocity distribution of different location of hillside with different grade ($t = 6/8T$)

3.2 涡量云图

图9~图11分别表示不同时刻不同坡度的山坡中截面 ($X=0$) 的涡量云图, 涡量的变化范围相同均为 $-1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 。由图可见, 随着坡度的增加, 山坡的坡顶边缘处、坡顶平台和山坡后的涡强度增强。15°的山坡, 坡顶平台涡强度较弱, 对高度方向速度的影响较小, 可考虑安装风力机。30°的山坡, 坡顶边缘处已生成小尺度的旋涡, 若在平台上

安装风力机,需考虑涡运动对下游流体速度和湍动能的影响。当坡度较大为 45° 时,坡顶边缘处的涡强度较强,生成大尺度的旋涡,旋涡在坡顶平台发展、运动和耗散,使得平台处的涡强度也较大,不建议在此处安装风力机,旋涡的非定常运动不仅影响周围流体湍流强度的变化,还会影响风力机的入流速度,使得风切变更加复杂从而影响风力机的输出功率。

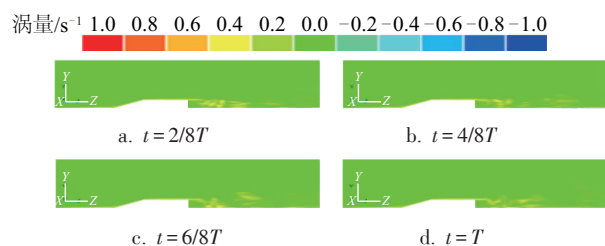


图9 坡度为 15° 的山坡中截面的涡量云图

Fig. 9 Vorticity contours of middle section of hillside with 15°

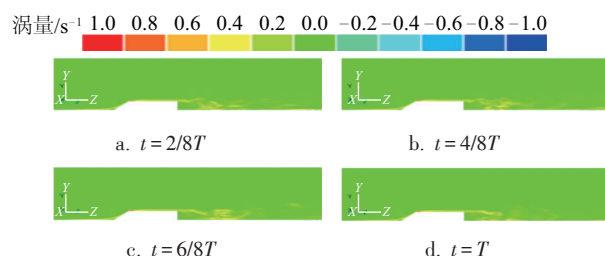


图10 坡度为 30° 的山坡中截面的涡量云图

Fig. 10 Vorticity contours of middle section of hillside with 30°

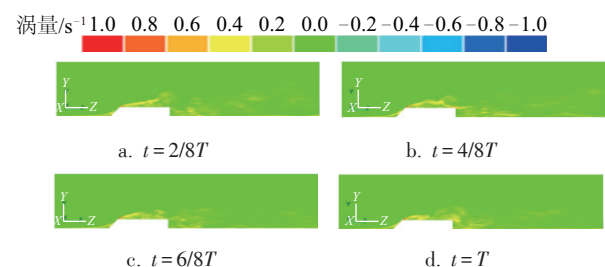


图11 坡度为 45° 的山坡中截面的涡量云图

Fig. 11 Vorticity contours of middle section of hillside with 45°

3.3 湍动能

图12~图14分别表示不同时刻不同坡度的山坡中截面($X=0$)湍动能变化的云图,湍动能的变化范围为 $0 \sim 1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。由图可见,随着坡度的增加,山坡的坡顶边缘处、坡顶平台和山坡后的湍动能增强。 15° 和 30° 的山坡,山坡后湍动能较强,为了避免山坡后流体的强湍流流动导致风力机和塔架的

振动,应把风力机安装在距山坡 $10H$ 之后,如图5~图8描述的不同时刻不同位置处的速度分布。 45° 的山坡,坡顶平台的湍动能较大,湍流脉动剧烈,不建议安装风力机。

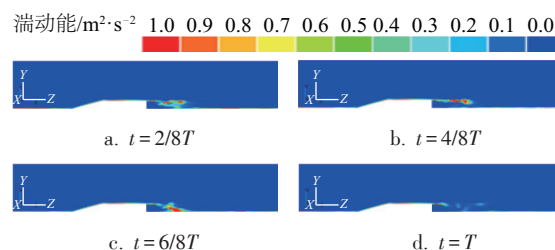


图12 坡度为 15° 的山坡中截面的湍动能云图

Fig. 12 Turbulent energy contours of middle section of hillside with 15°

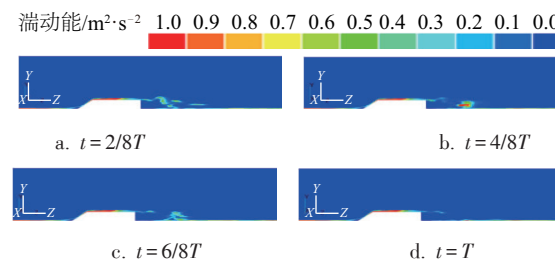


图13 坡度为 30° 的山坡中截面的湍动能云图

Fig. 13 Turbulent energy contours of middle section of hillside with 30°

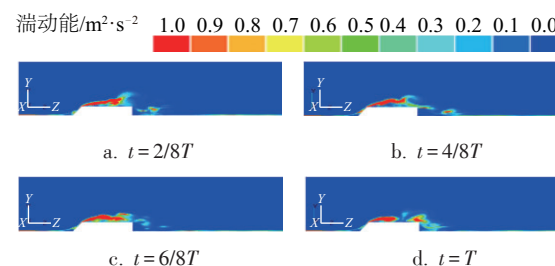


图14 坡度为 45° 的山坡中截面的湍动能云图

Fig. 14 Turbulent energy contours of middle section of hillside with 45°

4 结 论

本文采用CFD数值模拟方法研究坡度为 15° 、 30° 和 45° 的山坡周围流体绕流的特点,主要结论如下:

- 1) 15° 和 30° 的山坡坡顶风速品质较好,可考虑安装风力机;
- 2) 为了避免山坡后流体的强湍流流动,导致风

力机和塔架的振动,应将风力机安装在距山坡 $10H$ 后;

3)山坡一侧可获得较好的风能,若在此处安装风力机可适当降低风力机的高度。

[参考文献]

- [1] Maxwell I E. Renewable energy innovation [M]. Managing Sustainable Innovation, Boston, MA: springer, 2009: 81—95.
- [2] Brahimi M T, Surugiu L. Public perception and reaction to wind energy development [A]. The 7th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery [C], Honolulu, Hawaii, 1998.
- [3] 徐国宾, 彭秀芳, 王海军. 风电场复杂地形的微观选址[J]. 水电能源科技, 2010, 28(4): 157—159.
- [3] Xu Guobin, Peng Xiufang, Wang Haijun. Micro-siting of complex terrain for wind power station [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 157—159.
- [4] Pope S B. Turbulent flows [M]. Cambridge University Press, 2000: 771.
- [5] Trifonopoulos D A, Glekas J P, Bergeles G C. Reliability of two numerical codes in predicting the wind field in complex terrain [J]. Wind Engineering, 1989, 13(6): 324—337.
- [6] Kim H G, Lee C M, Lim H C, et al. An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills [J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 66(1): 17—33.
- [7] Apslye D D, Castro I P. Flow and dispersion over hills: Comparison between numerical predictions and experimental data [J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67: 375—386.
- [8] Brodeur P, Masson C. Numerical site calibration over complex terrain [J]. Solar Energy Engineering, 2008, 130(3): 31020.
- [9] Bechmann A, Sørensen N N, Berg J, et al. The bolund experiment, part II: Blind comparison of microscale flow models [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 141(2): 245—271.
- [10] Churchfield M J, Lee S, Moriarty P J, et al. A large-eddy simulation of wind-plant aerodynamics [A]. 50 th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition [C], Nashville, Tennessee, 2012: 0537.
- [11] Churchfield M J, Lee S, Michalakes J, et al. A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics [J]. Journal of Turbulence, 2012, (13)14: 1—32.
- [12] Lee S, Churchfield M, Moriarty P, et al. Atmospheric and wake turbulence impacts on wind turbine fatigue loading [J]. Boundary Layer, 2011, 135(3): 14—16.
- [13] 魏慧荣, 康 顺. 风电场地形绕流的CFD结果确认研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 577—579.
- [13] Wei Huirong, Kang Shun. The validate and research of CFD result about the wind flow in wind farm terrain [J]. Engineering Thermophysics, 2007, 28(4): 577—579.
- [14] 李 磊, 张立杰, 张 宁, 等. FLUENT在复杂地形风场精细模拟中的应用研究 [J]. 高原气象, 2010, 29(3): 621—628.
- [14] Li Lei, Zhang Lijie, Zhang Ning, et al. Application of fluent on the fine-scale simulation of the wind field over complex terrain [J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(3): 621—628.
- [15] 沈 晶, 赖 旭. 峡谷地形条件下风电场风况数值模拟研究 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 167—171.
- [15] Shen Jing, Lai Xu. Numerical simulation of wind turbine of wind farm under valley terrain environment [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 167—171.
- [16] Menter F R, Kuntz M, Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model [J]. Turbulence Heat & Mass Transfer, 2003, 4: 625—632.
- [17] 左 薇, 康 顺, 仇永兴, 等. H型风力机气动性能数值分析 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(8): 1462—1465.
- [17] Zuo Wei, Kang Shun, Qiu Yongxing, et al. Numerical simulation of the aerodynamic performance of H type wind turbine [J]. Engineering Thermophysics, 2013, 34(8): 1462—1465.

NUMERICAL SIMULATION OF HILLSIDE OF WIND FARMS

Zuo Wei¹, Li Huimin¹, Rui Xiaoming², Wang Xiaodong², Kang Shun^{2,3}

(1. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China;

2. North China Electric Power University, Key Laboratory of CMCPPE Ministry of Education, Beijing 102206, China;

3. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The three-dimensional model of typical complex terrain hillside is numerically investigated by using CFD numerical simulation method with SST turbulence model in this paper. The characteristics of the fluid flow around the hillside with different grade of 15° , 30° and 45° in the condition of uniform speed are studied. The velocity distribution near the hillside with different grades at different locations in different times is analyzed in this paper. The process of the vortex generation and the variation of turbulent kinetic energy are discussed in the edge and platform of the hillside and after the hillside. The results showed that the quality of wind speed on the top of the hillside is good, and it is suitable for installing wind turbines with different grade of 15° and 30° . In order to avoid the strong turbulent after the hillside, which is lead to vibration of the wind turbine and the tower, the wind turbine should be installed from the hillside after $10H$ (H is the height of the hill). If the wind turbine installed near the hillside, it can be appropriate to reduce the height of the wind turbine, because it can get good wind energy near the hillside.

Keywords: typical complex terrain; hillside; three-dimensional; numerical simulation