

发电量预测误差受地形图精度影响分析

刘飞虹, 吴迪, 苗得胜, 张敏, 黎建峰

(明阳智慧能源集团股份有限公司, 中山 528400)

摘要: [目的]为了探究部分复杂地形风电项目中高精度地图发电量预测误差较低精度地图更大的原因。[方法]采用开源 CFD 软件 OpenFOAM 结合自编后处理程序, 针对项目输入为参考地图、高精度地图以及低精度地图的三种工况进行了计算分析。[结果]结果表明: 高精度地图测风塔位置处主风向地形较实际地形差异程度过大, 是造成发电量预测误差更大的原因。[结论]更进一步验证基准点(测风塔)地形对发电量影响的普遍性规律: 对不同精度地图而言, 基准点处周边地形与实际的相符程度决定了整场发电量的差异大小, 可为复杂地形风资源评估工作提供有益的参考。

关键词: 复杂地形风电场; 发电量预测; 地形图精度; 计算流体力学; 测风塔

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)S1-0041-06

Analysis of Effects of Map Precision on Forecast Error of Energy Production

LIU Feihong, WU Di, MIAO Desheng, ZHANG Min, LI Jianfeng

(Mingyang Smart Energy Group Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

Abstract: [Introduction] The paper aims to find out the reason why the forecast error of energy production using high-precision map is much larger than that using low-precision map in several wind power projects with complex terrain. [Method] The calculation and analysis of energy production under the conditions: reference map, high-precision map and low-precision map were carried out, by using the open source CFD software OpenFOAM with self-compiled post-processing program. [Result] The results show that the terrain along prevailing wind direction at meteorological mast excessively different from the reality leads to the greater forecast error of energy production in high precision map. [Conclusion] The data validate the analysis results and obtain the universal law that the consistency between terrain and reality at datum points of different precision maps determines the difference of total energy production. This work provides beneficial reference for wind resources assessment in complex terrain.

Key words: complex terrain wind farm; energy production forecasting; map precision; CFD; meteorological mast

随着我国陆上风电产业的迅猛发展, 高风速平坦地形的风资源开发步伐放缓, 中低风速复杂地形风电项目占比逐年增大。在开发过程中, 风资源评估作为微观选址及风电项目前期整体效益评估的重要环节, 准确性尤为重要。

相比较平坦地形而言, 复杂山区地形起伏变化大, 风况复杂多变, 评估准确度难以保证。为此, 国内外不少学者就复杂地形风电场风资源评估进行了大量的分析和研究工作^[1-5], 建立起一套比较成熟的风资源评估方法, 即通过计算流体力学(CFD)

手段, 结合测风数据修正, 实现对复杂多变风况下风电场发电量的准确预测, 目前已在行业内得到广泛应用^[6-11]。该方法依赖于输入资料的高准确度。但是在实际工程项目中, 经常出现高精度地图无法及时获取的情况, 只能选择低精度测绘地图, 甚至更低精度的 SRTM 数据库下载地图作为替代, 其中精度均特指基础地形图生成过程中涉及到的实测图的测图比例和 SRTM 地形图的空间分辨率。采用这种处理方式, 会引入地形误差。工程界一般认为, 地形图精度越高, 地形代表性越强, 从而发电量预测精度越高。然而, 实际应用过程中, 偶尔会出现用较高精度地图计算的发电量误差更大的现象。这一反常现象所暴露的问题在工程界并未获得足够的重视, 也少有针对误差原因分析的相关研究。

基于此, 本文针对一个实际项目案例, 分别采

收稿日期: 2019-01-21 修回日期: 2019-03-27

基金项目: 国家重点研发计划“可再生能源与氢能技术”重点专项“风力发电复杂风资源特性研究及其应用与验证”项目(2018YFB1501100)

用该项目野外实地测绘 1 : 2 000 比例尺地图、1 : 10 000 比例尺地图以及航天飞机雷达地形测绘使命(SRTM) SRTM1 Arc-Second Global 30 m 空间分辨率数据库下载地图作为参考地图、高精度地图以及低精度地图(经现场实地踏勘, 1 : 2 000 比例尺地图与现状地形一致性高, 故以此作为参考), 以 CFD 方法进行不同精度地图下气流状况模拟, 并基于测风数据推算整场发电量, 探究采用高精度地图时, 发电量预测精度不如低精度地图的原因。

1 发电量计算

1.1 计算流程简介

风电场年平均发电量计算, 一般通过仿真模拟与场内测风塔数据修正相结合的方法进行。具体计算流程如下:

1) 应用地形图文件及粗糙度文件, 进行相隔 22.5° 的 16 个风向下风电场区域气流状况模拟(定向计算), 提取结果点(测风塔、机位)水平风速, 计算结果点相对入流边界的风加速因子。

具体计算式如下:

$$Cm_{(dir)} = \frac{Vm_{(dir)}}{u_{ref}} \quad (1)$$

式中: $Cm_{(dir)}$ 是风加速因子; $Vm_{(dir)}$ 是结果点定向计算的水平风速; u_{ref} 是定向计算的入流风速。

2) 通过筛选、插补、拟合、订正等步骤, 处理原始测风数据, 获取测风塔位置相对机组轮毂高度的代表年测风数据时序文件。

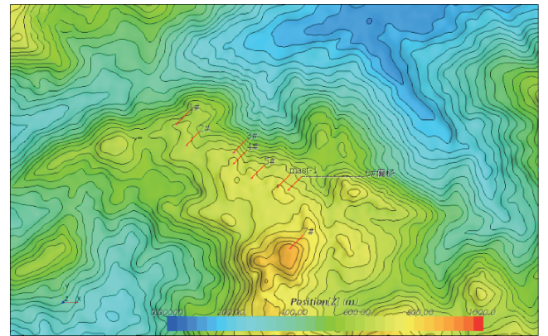
3) 基于定向计算所得风加速因子, 外推测风塔处测风数据至各个机位点, 得到机位点尾流前风速, 并应用尾流模型, 修正为尾流后风速。

4) 采用尾流后风速, 插值对应机型功率曲线, 求得功率时序文件, 再对时间积分得到机组全年发电量, 各机组发电量求和即为风电场年平均发电量。

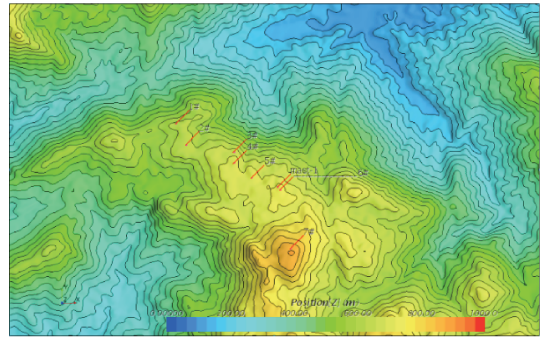
1.2 案例项目定向计算

本文以福建省东南部某风电场为例, 此风电场地势西北高、东南低, 最高海拔约 1 220 m, 最低海拔约 8 m, 地形平均坡度大(约 21.88°), 地形崎岖度高, 为复杂地形; 场址地区属亚热带海洋性气候, 风向分布集中, 主风向及主风能方向为东北风。风电场计划装机 26 台, 容量合计 78 MW。为保证测风塔代表性, 仅选取测风塔及其周边相邻的 7 个机位点, 计算不同精度地图下发电量情况。测

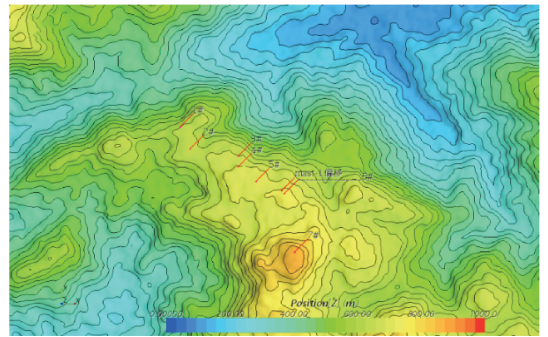
风塔及机位在参考地图、高精度地图、低精度地图上的点位分布如图 1 所示, 地形要素如表 1 所示, 由图表可知, 三种精度地图局部地形存在明显差异, 这样的差异在工程上是确实存在的。



(a) 参考地图



(b) 高精度地图



(c) 低精度地图

图 1 参考地图、高精度地图及低精度地图上测风塔及机位分布

Fig. 1 Location of meteorological mast and wind turbines on

采用 OpenFOAM 软件的建模工具建立模型。计算域在包含结果点的基础上外扩 5 km, 并对外部边缘进行平滑。计算域高度取 5.1 km, 约为场内海拔高差的 5 倍。

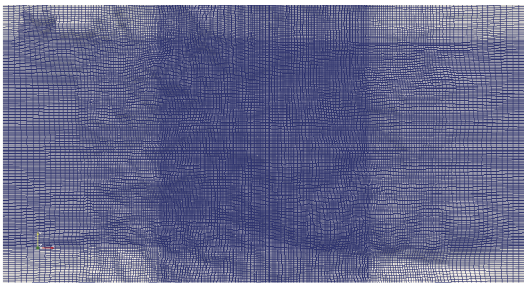
以六面体网格划分 $17 \text{ km} \times 17 \text{ km} \times 5.1 \text{ km}$ 空间范围计算域, 局部加密核心区域, 其中加密区域范围为 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$, 经网格无关性验证取水平方向网格尺寸为 20 m, 垂直方向底层网格尺寸为 4 m,

表 1 不同精度地图地形要素汇总

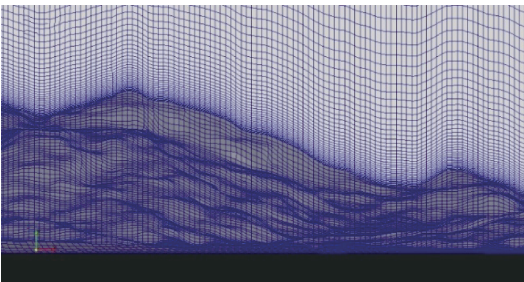
Tab. 1 Summary of topographic features for maps with different accuracy

编号 / -	参考地图			高精度地图			低精度地图		
	高程 /m	坡度 /°	坡向 /°	高程 /m	坡度 /°	坡向 /°	高程 /m	坡度 /°	坡向 /°
mast	725	20.8	292	730	19.9	297	720	17.1	345
1#	630	29.5	342	635	22.7	335	620	22.5	321
2#	647	7.6	62	649	12.3	91	645	5.7	41
3#	667	12.7	287	671	12.4	306	661	12.5	289
4#	704	6.9	208	705	5.1	240	694	19.4	249
5#	710	3.5	86	715	3.7	128	713	6.2	96
6#	736	9.4	130	738	7.9	152	734	9.7	345
7#	866	19.1	18	869	15.6	13	857	9.2	338

向上按比例增长。网格数量约为 1 130 万, 网格如图 2 所示。



(a) 水平方向



(b) 垂直方向

图 2 计算域网格示意图

Fig. 2 Grid generation schematic of computational domain

模拟使用地表粗糙度数据为 2010 基准年全球 30 m 地表覆盖数据(GlobeLand30 -2010)。

进行定向计算, 求解 16 个风向下测风塔与机位点的风速风向值, 以及各个风向下风加速因子。

1.3 案例项目综合计算

由定向计算获取的结果点风加速因子, 计算各机位点加速比(机位点与测风塔的风加速因子之

比), 由比值关系外推测风数据至各个机位点, 最终计算得到整场发电量结果。

2 发电量误差原因分析

2.1 定向计算结果分析

整理包含测风塔在内的 8 个定向结果点在不同精度地图 45° 主风向下的风加速因子, 作对比如图 3。

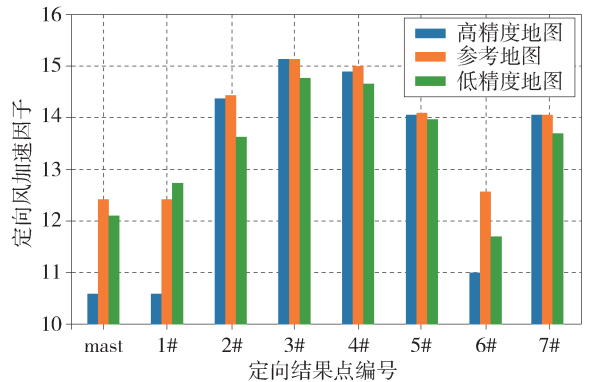


图 3 不同精度地图结果点定向风加速因子对比

Fig. 3 Comparison of directional wind accelerating factor for maps with different accuracy

从图 3 可以看到, 相比低精度地图, 高精度地图风加速因子在多数点与参考地图偏差较小, 相符性较好, 但也存在如测风塔 mast、机位 6# 风加速因子差异较大的情况。

针对差异较大的点位, 由于 mast 与 6# 地理位置较接近, 因此仅提取不同精度地图 45° 风向时, mast 位置处水平风速在垂直方向的分布, 作风廓线对比如图 4 所示。

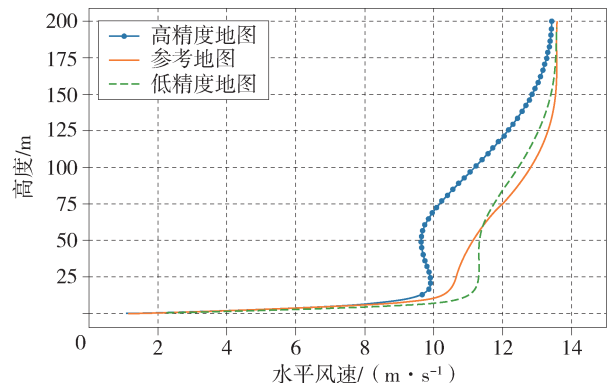


图 4 不同精度地图测风塔处风廓线对比

Fig. 4 Comparison of wind profiles at meteorological mast for maps with different accuracy

从风廓线的对比可以发现,高精度地图风廓线与参考地图差异较大,而低精度地图风廓线较接近参考地图,特别是在距地面 85 m 高度(轮毂高度)位置时,水平风速与参考地图偏差较小。由于仿真过程中,设置大气层稳定度为中性,且不考虑科式力影响,因此认为不同精度地图测风塔处垂直风廓线差异仅受来流前方地形影响^[12]。

结合以上情况,高精度地图整体地形代表性优于低精度地图,但存在测风塔 mast 以及机位 6#主风向前方地形与参考地图地形差异较大的情况,导致高精度地图风加速因子出现反常现象。

2.2 综合计算结果分析

为了进一步考察这种反常现象对发电量结果的影响,以 45°主风向向下测风塔与机位点的风加速因子,计算不同精度地图下各个机位点加速比,作对比如图 5 所示。

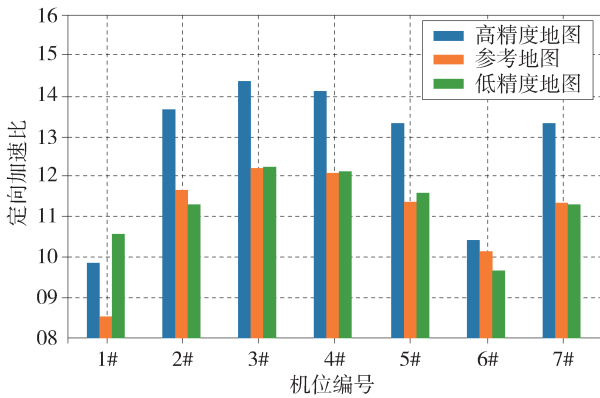


图 5 不同精度地图各机位点的定向加速比对比

Fig. 5 Comparison of wind speed-up ratios at wind turbines for maps with different accuracy

由加速比的定义可知,加速比计算是以测风塔处风加速因子为基准进行的,因此当基准出现较大偏离(偏大或偏小)时,会导致大部分机位点的加速比呈现一致性的偏差(同时偏小或偏大)。结合图 5 可以看到,测风塔处风加速因子反常,使得高精度地图大部分机位点加速比相较参考地图同时呈现偏大的状态,且远远高于低精度地图的偏差。

根据各机位点所有扇区加速比,结合测风数据以及功率曲线推算得到各机位点的发电量如表 2 所示,并作对比如图 6 所示。

表 2 不同精度地图发电量计算结果汇总

Tab. 2 Summary of calculation results of energy production for maps with different accuracy

编号 / -	参考地图计算发电量/(MWh · a ⁻¹)	高精度地图计算发电量/(MWh · a ⁻¹)	低精度地图计算发电量/(MWh · a ⁻¹)
1#	9 697.9	10 801.9	11 096.3
2#	11 178.8	12 520.1	10 994.3
3#	11 146.5	12 215.7	11 617.9
4#	10 829.4	11 905.4	11 047.1
5#	10 289.3	11 369.8	10 500.6
6#	9 624.2	9 615.4	9 437.0
7#	10 582.9	11 886.0	10 231.5
总计	73 348.9	80 314.3	74 924.8
相对误差	0%	-9.5%	-2.1%

注:相对误差指目标与参考地图计算总发电量的相对误差。

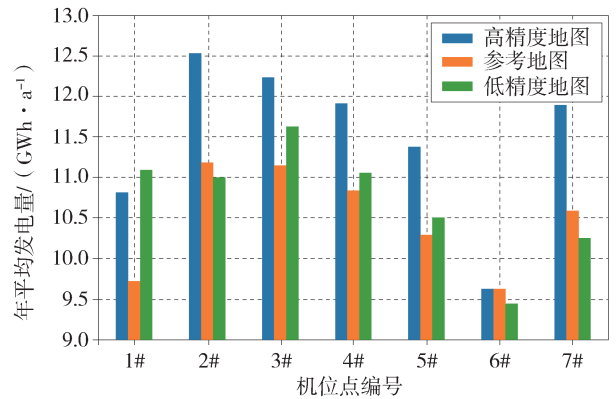


图 6 不同精度地图机位点发电量计算结果对比

Fig. 6 Comparison of energy production at wind turbines for maps with different accuracy

根据表 2、图 6 对比情况可见,由于高精度地图加速比反常现象出现在主风向,对发电量计算影响占比较大,因此发电量分布情况与定向加速比分布情况非常相似:采用高精度地图预测的大部分机位点发电量远大于参考地图,整场发电量预测误差较大,约为 -9.5%,而采用低精度地图时整场发电量预测误差仅 -2.1%。

由以上分析,探讨了地形、风加速因子、风加速比、风电场发电量等差异之间的因果关系,通过层层推进,明晰了高精度地图发电量预测误差远远大于低精度地图的原因是,高精度地图测风塔位置处主风向地形与参考地图地形差异过大。

3 分析结果验证

为了验证基准点(测风塔)处地形对发电量影响的普遍性规律, 采用变更基准点的方式进行发电量计算对比。

变更基准点的具体方式, 即以每一机位点作为基准点, 采用测风塔数据作为基准点测风数据, 推算整场 1#-7#机组总发电量。汇总不同精度地图下以此方式计算的整场发电量结果, 作对比如图 7 所示。

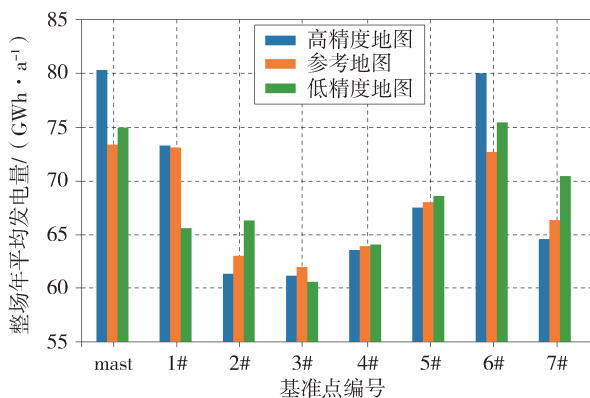


图 7 不同精度地图不同基准点的整场发电量对比

Fig. 7 Comparison of total energy production on reference points for maps with different accuracy

从图 7 可以明显看出, 采用机位 1#、2#、3#、4#、5#以及 7#作为基准点计算整场总发电量时, 高精度地图结果较低精度地图更接近参考地图, 或者高精度地图结果与低精度地图差异较小, 均接近参考地图; 仅当以测风塔 mast 或者机位 6#作为基准点时, 会出现高精度地图整场发电量结果与参考地图差距较大的现象, 结合图 3 可知, 这是由于高精度地图基准点处风加速因子与参考地图差异过大所致。

综上所述, 对不同精度地图而言, 基准点处周边地形与实际的相符程度决定了整场发电量的差异大小。如果能保证基准点位置周边地形与实际地形情况一致, 就能保证整场发电量结果差异较小; 如果基准点位置周边地形的准确性难以保证, 则整场发电量的不确定性就会变大。

在未来工程项目中, 当高精度地图缺失时, 可采用低精度地图作为替代, 但需要对基准点周边地形进行详细勘察, 保证地形图与现状地形的相符程度, 若存在较大差异时, 应对基准点周边进行小范

围测绘输出局部高精度地图, 与低精度地图作拼接处理。

4 结论

本文应用开源 CFD 软件 OpenFOAM 结合自编后处理程序对高精度地图发电量结果较低精度地图误差更大的情形进行了计算分析, 并开展了发电量受基准点地形影响的规律验证, 所得结论可以为复杂地形风资源评估工作提供有益的参考。主要的工作以及结论如下:

1) 本文选取某实际风电场项目, 采用 CFD 定向计算以及综合计算, 对比了不同精度地图发电量计算结果, 详细分析了采用高精度地图时, 发电量预测误差远大于低精度地图的原因。

2) 分析发现, 高精度地图测风塔位置处主风向地形较实际地形差异程度过大, 是造成发电量预测误差更大的原因。

3) 本文验证了基准点地形对发电量影响的普遍性规律, 即对不同精度地图而言, 基准点处周边地形与实际的相符程度决定了整场发电量的差异大小。

为了尽量消除地形图精度带来的影响, 需保证作为基准点的测风塔周边地形与实际的相符程度, 若存在较大差距, 建议对测风塔周边进行小范围测绘并拼接。

参考文献:

- [1] WAKES S J, MAEGLI T, DICKINSON K J, et al. Numerical modelling of wind flow over a complex topography [J]. Environmental Modelling and Software, 2010, 25(2): 237-247.
- [2] 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): 415-420.
LIANG S C, ZHANG X D, KANG S, et al. Assessment method of wind resources in complex terrain based on numerical simulation [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(3): 415-420.
- [3] 李辰奇, 许昌, 杨建川, 等. 基于 CFD 的复杂地形风能分布研究 [J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(3): 270-274.
LI C Q, XU C, YANG J C, et al. Prediction of wind energy distribution in complex terrain using CFD [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2013, 35(3): 270-274.
- [4] 张晓东. 风电场风资源计算的 CFD 模型研究 [J]. 现代电力, 2013, 30(4): 39-43.

- ZHANG X D. CFD model for wind farm resource evaluation [J]. *Modern Electric Power*, 2013, 30(4): 39-43.
- [5] 吴兵恒, 宋梦讓, 陈凯, 等. 基于粒子尾流模型的风电场风资源评估系统 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(12): 2442-2446.
- WU B H, SONG M X, CHEN K, et al. Wind resource assessment system of wind farm based on particle wake model [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(12): 2442-2446.
- [6] 方艳莹, 徐海明, 朱蓉, 等. 基于 WRF 和 CFD 软件结合的风能资源数值模拟试验研究 [J]. *气象*, 2012, 38(11): 1378-1389.
- FANG Y Y, XU H M, ZHU R, et al. Study on numerical simulation of wind energy resources based on WRF and CFD models [J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(11): 1378-1389.
- [7] 殷建光. 复杂地形条件下应用 CFD 技术进行风能资源评估应用分析 [J]. *风能*, 2014(1): 90-95.
- YIN J G. Analysis of wind energy resource assessment application with CFD under the condition of complex topography [J]. *Wind Energy*, 2014(1): 90-95.
- [8] 王洋, 周向阳. 基于 Scada 数据的风电场改扩建数值模拟研究 [J]. *南方能源建设*, 2017, 4(3): 92-96.
- WANG Y, ZHOU X Y. Research on the method for the reconstruction and expansion of the wind farm based on the Scada data [J]. *Southern Energy Construction*, 2017, 4(3): 92-96.
- [9] 张雪芝, 王维庆, 王海云. 风电场的风资源评估及产能预估 [J]. *可再生能源*, 2017, 35(12): 1876-1880.
- ZHANG X Z, WANG W Q, WANG H Y. Wind resource assessment and capacity estimation of wind farm [J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(12): 1876-1880.
- [10] 苗得胜, 吴迪, 刘飞虹. 复杂地形测风塔被遮挡引起的发电量误差原因分析及修正 [J]. *风能*, 2018(5): 82-87.
- MIAO D S, WU D, LIU F H. Analysis and correction of generation error caused by obscure tower on complex terrain [J]. *Wind Energy*, 2018(5): 82-87.
- [11] 马致远, 孙凯丰, 侯金锁, 等. 基于优化 CFD 模型的风电场风速数值模拟 [J]. *可再生能源*, 2018, 36(3): 446-452.
- MA Z Y, SUN K F, HOU J S, et al. Wind farm wind speed numerical simulation based on optimized CFD models [J]. *Renewable Energy Resources*, 2018, 36(3): 446-452.
- [12] 廖明夫, GASCH R, TWELE J, et al. 风力发电技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009.
- LIAO M F, GASCH R, TWELE J, et al. *Wind power generation technology* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press Co., Ltd., 2009.

作者简介:



LIU F H

刘飞虹 (通信作者)

1990-, 男, 回族, 湖南邵阳人, 计算流体力学工程师, 硕士, 主要从事风资源评估研究工作 (e-mail) liufeihong@my-wind.com.cn。

吴迪

1982-, 女, 吉林长春人, 计算流体力学工程师, 硕士, 主要从事风资源评估研究工作 (e-mail) wudi02@my-wind.com.cn。

苗得胜

1989-, 男, 河南济源人, 计算流体力学工程师, 硕士, 主要从事风资源评估研究工作 (e-mail) miaodesheng@my-wind.com.cn。

张敏

1990-, 男, 山西晋中人, 计算流体力学工程师, 硕士, 主要从事风资源评估研究工作 (e-mail) zhangmin@my-wind.com.cn。

黎建峰

1981-, 男, 广东东莞人, 计算流体力学工程师, 博士, 主要从事风资源评估及风机气动问题研究工作 (e-mail) lijzsu@163.com。

(责任编辑 李辉)