

## 上风向山头对风电机组的安全性影响研究

牛亚路, 李岩, 王印

引用本文:

牛亚路, 李岩, 王印. 上风向山头对风电机组的安全性影响研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 43–49.

NIU Yalu, LI Yan, WANG Yin. Research on the Influence of Upwind Hilltop on the Safety Impact of the Wind Turbine[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 43–49.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 基于CFD的复杂地形风电机组机位微地形风资源数值模拟研究

Numerical Study on Wind Resource Around the Turbine Site for Real Complex Terrain Based on CFD Method

南方能源建设. 2020, 7(1): 59–64 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.009>

#### 复杂地形风电场微观选址实践探讨

Discuss on the Work Practice of Wind Farm Micro-siting in Complex Terrain Region

南方能源建设. 2019, 6(2): 59–63 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.011>

#### 基于长期实测资料的风速测量相关推测方法对比

Comparison of Measure-correlation-predict Algorithms in Offshore Wind Power Assessment with Multi-year Observation of Automatic Weather Stations

南方能源建设. 2017, 4(3): 97–102,106 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.03.018>

#### 山地风电场风机扇区管理优化分析与探讨

Optimization Analysis and Discussion on Fan Sector Management in Mountain Wind Farm

南方能源建设. 2018, 5(z1): 255–261 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.047>

#### 尾流算法与风向变化对海上风机排布影响研究

Research on Offshore Wind Farm Units Layout Considering the Algorithm of Wake Model and the Change of Wind Direction

南方能源建设. 2019, 6(2): 54–58 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.010>

# 上风向山头对风电机组的安全性影响研究

牛亚路<sup>✉</sup>, 李岩, 王印

(明阳智慧能源集团股份有限公司, 广东 中山 528400)

**摘要:** [目的] 由于生态保护和风场边界等条件的限制, 有些机位点的主风向方向存在明显山头障碍物遮挡, 影响了机组的发电量和安全性能, 文章旨在研究减小山头对机组影响的方法。[方法] 基于STAR-CCM+软件平台对主风向上有山头遮挡的机位点附近地形进行了数值模拟, 分析了扇区管理、提高轮毂高度、地形修整等方法对机组的安全影响。[结果] 结果表明: 扇区管理、提高轮毂高度和地形修整都能改善风机的安全性。但在该项目中, 采用双平台的地形修整的方法对改善风机安全性更加有效。[结论] 分析结果可为如何降低来风方向的山头对风机的影响提供方法参考。

**关键词:** 风电开发; 安全性分析; 风电机组; CFD方法; 地形优化

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)04-0043-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on the Influence of Upwind Hilltop on the Safety Impact of the Wind Turbine

NIU Yalu<sup>✉</sup>, LI Yan, WANG Yin

(Ming Yang Smart Energy Group Limited, Zhongshan 528400, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] Due to the limitation of ecological protection and wind field boundary, there are obvious hill obstacles in the prevailing wind direction of some turbine sites, which affects the generating capacity and safety performance. This paper aims to study the methods to reduce the impact of the hilltops to the wind turbine. [Method] The numerical simulation method was applied for the terrain with hilltop in the prevailing wind direction around the turbine site based on STAR-CCM+ software, analyzing the influence of sector management, elevating hub height and terrain optimization on the safety performance of the wind turbine. [Result] It's shown that sector management, elevating hub height and terrain optimization can improve the safety of the wind turbine. However, the method of double platform terrain optimization is more effective to improve the safety of the wind turbine for the project. [Conclusion] The results can provide reference for how to reduce the impact of upwind hilltop on the wind turbine.

**Key words:** wind power development; safety analysis; wind turbine; CFD method; terrain optimization

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

随着风电大规模开发, 复杂地形下的风电场内的风机由于受到微地形的影响(例如山头遮挡等), 发电机组的发电量和安全性会受到一定的影响, 虽然将机位立在主风向方向的坡前位置或山顶位置对于机组的安全性和发电量都较为有利<sup>[1-2]</sup>, 但是实际的机位选择中, 由于受到风电场范围、生态红线和风向的均匀分布等因素的约束, 很难将机位点立

在主风向上的坡前位置, 甚至会将风机立于坡后位置, 也就是上风向方向有山头遮挡的位置。因此, 研究当风机立在主风向方向有山头遮挡的下风向位置时, 如何保证机组的安全运行和发电量具有实际的工程和经济意义。

在研究复杂地形对风资源的影响, 评估由于地形的改变对风机安全性和发电量产生的影响时, 主

要方法有风洞实验、现场实测和数值模拟,考虑到经济性和研究周期等因素以及现代计算机计算能力的大幅提升,CFD方法成为该项研究工作的首选。

国内外学者针对复杂地形下的微观地形对风资源的影响进行了大量的研究工作。ABDI<sup>[3]</sup>采用多种湍流模型进行了丘陵地形风环境数值模拟,得到三维真实地形地域内风特性。UCHIDA<sup>[4]</sup>利用两种网格系统仿真计算了山丘等复杂地形下的风资源分布情况。DHUNNY<sup>[5]</sup>、LEE<sup>[6]</sup>、沈晶<sup>[7]</sup>等对复杂地形风场的风资源情况进行了CFD模拟计算,为复杂地形下的风力发电机机位点的选取提供了参考。在CFD计算的湍流模型研究方面,BLOCKEN<sup>[8]</sup>采用修正后的 $k-e$ 模型模拟了复杂地形下风资源情况,并获得了与实测结果吻合较好的风速风向分布。葛文鹏<sup>[1]</sup>、左薇<sup>[2]</sup>对山头立机位置进行了讨论,建议机位点应立在来风方向山头的上风向位置。

本文以广西某风场的H05-01机位点为例,在相关地形研究的数值模拟基础上,对风机实际安装及运行过程中,如何降低因地形带来的安全隐患和发电量提升方法展开研究,为实际的工程应用提供理论支撑。

## 1 项目情况说明

该项目为广西一复杂山地的风场,由于生态保护红线的要求,如图1所示,H05-01号机位点只能布置在偏离山头的的位置,机位点和附近山头的高度落差相差33 m,山头位置方向和主风向方向较为接近,如图1和图2所示,主风能风向为北偏东10°方向,山头方向为北偏东65°方向,且由于生态环境保护的要求,对山头的施工只能在靠近风机一侧进行,初步拟采用单机容量3.2 MW,轮毂高度为95 m,机型参数表如表1所示。经过前期的评估,当风向在北偏东20°~90°范围内无法消除山头给风机运行带来的安全风险,且在此区间非主风能方向,故拟采用扇区管理的方式使风机在此风向区间降功率运行或停止运行。本文重点研究如何通过对山头地形的修整,保证来风方向为主风能方向(10°)时机组能够安全运行的方法措施。

### 1.1 数值模拟方法

本文选取机位实际地形作为研究对象,在机位

表1 机型参数表

Tab. 1 Model parameter table

项目	参数
机组直径/m	145
塔筒高度/m	90
切入风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	2.5
切出风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	20
额定风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	8.9
最大风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	37.5
安全等级	ⅢA



图1 H05-01号机位点风机附近的地形图  
Fig. 1 Topographic map of H05-01 turbine site

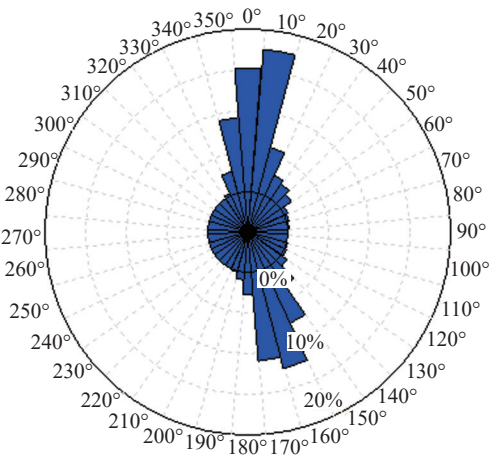


图2 H05-01号机位点风能玫瑰图  
Fig. 2 Wind energy rose chart of H05-01 turbine site

附近采用分辨率为2 m×2 m高精度测绘地图,范围覆盖直径约3 km。外区域采用30 m×30 m低精度地图,此地图来自地理空间数据云-DEM数字高程数据-GDEMDEM 30 m分辨率数字高程数据,两种地图是在坡度较缓的位置做的拼接,拼缝宽度60 m,拼接段进行了线性插值过渡。由于拼段两侧都是取自实际地形,拼缝相比计算域极小,而且远离风机



(约2 km), 地形起伏较缓, 此种处理方式对模拟结果影响可忽略不计<sup>[9]</sup>。生成的地形高程图如图3所示。

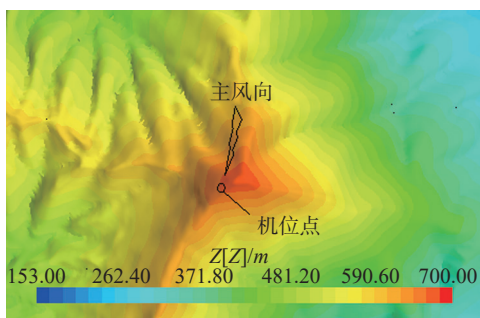


图3 地形高程图

Fig. 3 The elevation map of terrain

以H05-01机位点为中心位置, 建立长方体计算域, 入口距风机位置为5 km, 出口距风机位置为8 km, 计算域高度取3 km, 网格划分策略参考文献[10-11], 两侧距风机采用六面体非结构化网格对计算域进行离散, 对机位点位置单独加密, 最终网格总数约为2 000万, 如图4所示。

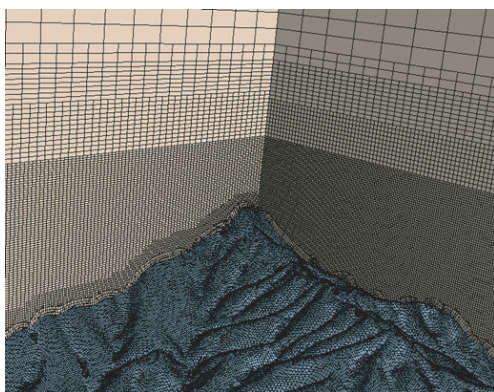


图4 网格划分图

Fig. 4 Mesh of terrain

入口来流风速采用对数分布的边界条件<sup>[12-13]</sup>, 如式(1)和式(2)所示, 湍流模型采用RNG  $k-\epsilon$ 模型, 边界层内流场采用近壁面函数处理。仿真采用稳态求解, 设置最大迭代步数1 000步, 通过监控特定点的风速和残差待其稳定后, 获得稳定的流场分布。

$$u = \begin{cases} \frac{u_\tau}{k} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) & z \leq z_h \\ u_h & z > z_h \end{cases} \quad (1)$$

$$u_\tau = k u_{ref} \left( \ln \frac{z_{ref} + z_h}{z_0} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中:

$u_\tau$  ——摩擦速度 (m/s);

$k$  ——Karman 常数;

$z_h$  ——临界高度 (m);

$z_0$  ——地面粗糙度 (m);

$z_{ref}$  ——参考高度 (m);

$u_{ref}$  ——参考风速 (m/s), 根据该场区的风资源信息, 假定入口100 m高度风速为7 m/s, 入口风速沿高度层为(1)式的风廓线分布。

根据实际地形建立的六面体网格有东西南北上下共计6个面需要设定边界条件。根据风向设置来流的方向为速度入口边界, 流出方向为压力出口边界。上边界为对称边界, 下边界无滑移壁面。假设空气运动是3D的不可压缩稳定流动, 忽略地转偏向力(科氏力)的影响<sup>[14]</sup>。

## 1.2 发电量计算方法

本文采用Wasp软件进行发电量计算, 风场区域地形采用1.1节中机位点附近的高精度测绘地图和周围的低精度地图拼接而成, 利用Globalmapper软件生成等高线, 最后使用Wasp自带的软件Wasp map editor编辑粗糙度和生成地图文件。

在实际风场环境下, 风向风速随时间变化情况非常复杂, 本文主要讨论理想状态的定风速情况下, 地形对风机叶轮盘面的风资源影响情况。采用叶轮盘面的轮毂高度处风速为Wasp发电量计算的输入条件, 评价不同工况下风机的发电量情况。

## 2 优化方法探究

按照风机机位点常规的施工设计思路, 机位点的施工需在机位点处挖掘一平台进行风机基础的安装工作, 平台的大小根据机组的大小和载荷情况来决定, 一般平台直径在40~60 m, 本文所选取的H05-01号机位点的施工平台如图5所示。按照上节给出的仿真模型, 计算10°来风方向下(此方向的地形剖面图如图6所示), 机组叶轮面的风资源情况, 评价该地形下机组的安全性。

一般情况下, 陆上复杂地形条件下, 地面以上200 m以内的近地表区域风速变化较大, 气流扰动较为严重。通过CFD计算可以得出, 该地形下, 机组的迎风方向的地形速度云图如图6所示, 叶轮盘面的速度分布云图和湍流分布云图如图7所示, 通



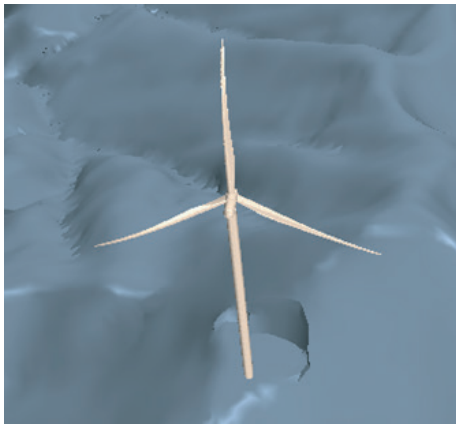


图5 施工平台地形图

Fig. 5 Topographic map of construction platform

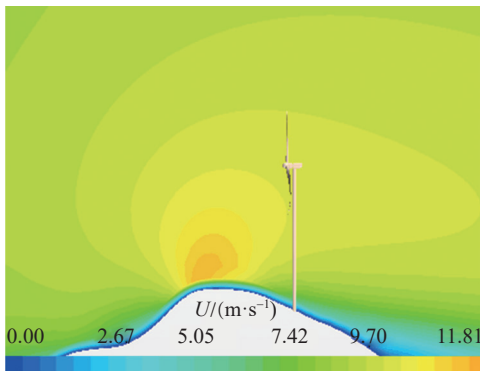


图6 机位来风方向的速度云图

Fig. 6 Velocity distribution around wind turbine in wind direction

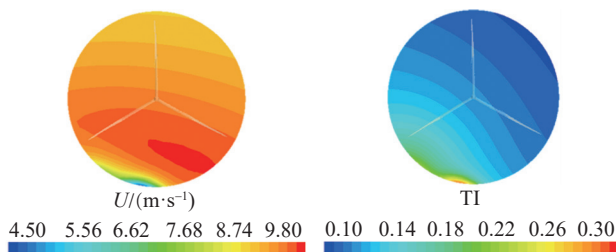


图7 机位盘面湍流强度和速度图

Fig. 7 Turbulence intensity and velocity distribution of wind turbine rotor disk

过计算可知,该地形情况下,叶轮盘面靠近下叶尖左侧受到的地形影响较大,最大风切变指数为1.61,湍流强度为0.29,此时的切变指数和湍流强度远远超过机组的设计极限,会导致机组的周期性振动,影响机组运行安全,故下一步需要采取措施,保证机组的安全运行。

## 2.1 扇区管理

H05-01 机位点北偏东  $10^\circ$  方向为主风能方向,

由于在该地形下风切变值和湍流强度超标,影响机组安全运行,可采用扇区管理的方法,当来风方向在  $10^\circ$  范围内时,风机停止或降低负荷运转,以保证机组的安全性。通过 Wasp 计算可知,如果当来风方向为  $10^\circ$  时,风机停止运行,在不考虑尾流的情况下,每年该风机会减少 10% 以上的发电量,折合标准年等效满发小时数 280 h,此时由于在东偏北  $10^\circ \sim 90^\circ$  方向都采取扇区管理的方式,机组的累积发电量损失将达到 15% 以上,不能满足风电机组建设的经济性要求。

## 2.2 提高轮毂高度

由于按照风机基础常规的施工方案,其下叶尖左侧的风速过小、湍流强度超标,无法保证机组的安全性,现通过提高轮毂高度来消除机组的安全隐患。图8和图9分别为风机轮毂高度提高 5 m、10 m、15 m 的叶轮盘面的速度和湍流强度云图,表2为不同轮毂高度的风切变指数、湍流强度和轮毂高度处的风速大小。可以看出,随着轮毂高度的提升,由于山坡的加速效应逐步减弱,轮毂高度处风速略微降低,但下叶尖左侧处的速度增加,降低了下叶尖处的风切变指数和湍流强度。

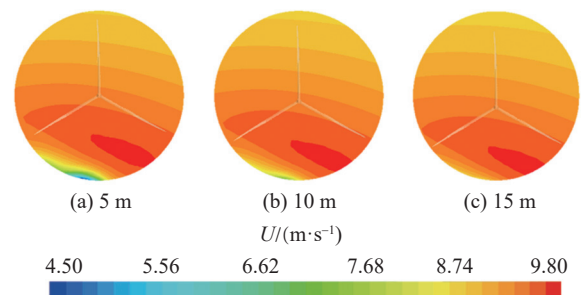


图8 轮毂高度提升 5 m、10 m、15 m 的盘面风速分布云图

Fig. 8 Wind speed distribution of wind turbine rotor disk when the hub height is elevated 5 m, 10 m and 15 m

根据经验分析,一般情况下盘面的最大的风切变指数小于 0.16,湍流强度小于 0.2,基本能够满足 A 类风机<sup>[15]</sup>的要求,当风切变指数和湍流强度达到该值时,可进行下一步详细的载荷计算工作。由表 2 可以看出,当轮毂高度提升 15 m 至 110 m 时,机组满足要求可进行下一步的载荷计算工作。而此时,由于轮毂高度的提升,山坡对风的加速效应减弱,轮毂高度的风速相比 95 m 的轮毂高度风速降低了 1.6%,通过 Wasp 计算可知,在不考虑尾流影

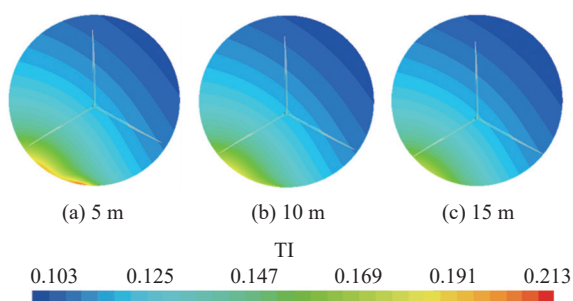


图 9 轮毂高度提升 5 m、10 m、15 m 的盘面湍流强度分布云图

Fig. 9 Turbulence intensity distribution of wind turbine rotor disk when the hub height is elevated 5 m, 10 m and 15 m

响的情况下, 年总发电量减少了 188 MW, 折合标准年等效满发小时 59 h, 并且会增加风机基础的载荷和建设成本。

表 2 叶轮盘面的速度统计

Tab. 2 Speed statistics of wind turbine rotor disk

方案	盘面最大风切变指数	盘面最大湍流强度	轮毂高度处风速/( $m \cdot s^{-1}$ )
95 m 轮毂高度	1.61	0.29	9.39
100 m 轮毂高度	1.13	0.21	9.34
105 m 轮毂高度	0.65	0.19	9.29
110 m 轮毂高度	0.15	0.17	9.25

### 2.3 地形修整

为了使风机叶轮面的湍流强度和风切变值满足机组的安全运行要求, 采用提高轮毂高度的方法, 往往会导致成本和时间周期的增加, 故在实际施工过程中, 常采用对风机周围地形进行修整的方法, 将对风机来风方向有遮挡的山头进行适量合理地挖掘修整, 以保证机组的安全运行。

采用在原施工平台对地形进行进一步施工, 如图 10 所示, 图 10 (a) 为风机基础的常规设计方案, 仅开挖一个能够满足风机基础安装的施工平台, 对于 3 MW 级别的风机, 开挖半径一般在 40 ~ 60 m 即可满足施工要求; 图 10 (b) 是在最初的风机基础安装平台上向外扩大挖掘施工, 直接将来风方向阻挡的山头挖掉, 该施工方式简单, 能够减少来风方向的山头遮挡, 但施工量较大; 图 10 (c) 采用双平台设计, 仅对来风方向有阻挡的部分山头进行平台化挖掘, 一般可按照来风方向平台和风机下叶尖垂直高度在 10 m 左右的方法进行初始设计, 然后根据周围地形进行逐步优化。该方法在减少来

风方向山头遮挡的同时, 也减小了土方挖掘的作业量。



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

图 10 三种不同的机位点基础平台施工方案

Fig. 10 Three different construction schemes of wind turbine foundation platform

图 11 和图 12 为三种施工方案的叶轮盘面速度分布和湍流强度分布, 可以看出, 图 10 (b) 和图 10 (c) 相比图 10 (a) 的施工方案, 湍流强度明显降低, 通过对盘面湍流强度进行数值提取, 两种方案的湍流强度都小于 0.2, 且下盘面叶尖处的风速增加, 减小了叶轮面的最大风切变指数, 经过计算, 图 10 (b) 和图 10 (c) 两种方案叶轮盘面的最大风切变指数分别为 0.13 和 0.15, 均小于 0.16。另

外, 由于对山头进行挖掘施工, 山体对轮毂高度处的加速效果减弱, 图 10 (b) 和图 10 (c) 相比图 10 (a) 的施工方案风速降低了 1.1% 和 1.0%, 通过 Wasp 计算, 发电量减少了 1.5% 和 1.3%, 考虑到图 10 (c) 方案的施工量远小于图 10 (b) 方案, 且发电量略高, 故采用图 10 (c) 的方案作为最终的施工方案进行下一步的载荷迭代计算。

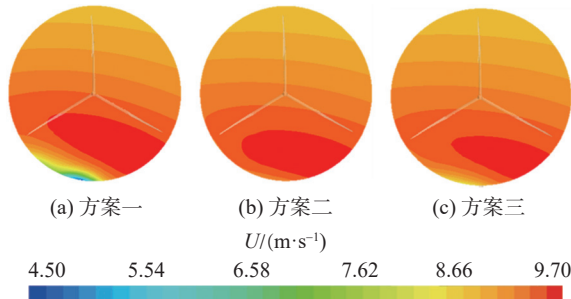


图 11 三种基础平台施工方案的盘面风速分布云图  
Fig. 11 Disk wind speed distribution of three wind turbine foundation platform construction schemes

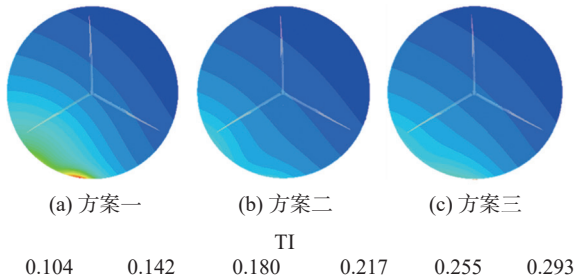


图 12 三种基础平台施工方案的盘面湍流强度分布云图  
Fig. 12 Disk turbulence intensity distribution of three wind turbine foundation platforms construction schemes

### 3 结论

通过建立广西某项目 H05-01 机位点附近的三维风场模型, 提出了三种评估减小风机湍流强度和风切变指数的方案, 并对提高轮毂高度和地形修整两种方案进行了 CFD 计算, 得出了以下结论:

1) 如果风机来风方向有山头遮挡时, 会导致风机叶轮盘面风切变指数和湍流强度严重超标, 影响机组的运行安全。

2) 通过提高轮毂高度和对地形进行修整, 都能够改善机组的安全性能, 具体方案可根据实际的项目决定, 本文的 H05-01 机位点采用地形修整的方案优于提高轮毂高度方案。

3) 当机组来风方向有山头遮挡时, 采用削减山头的地形修整方案, 图 9 (c) 的双平台地形优化方法, 能够有效兼顾风电机组的安全性和经济性要求。

#### 参考文献:

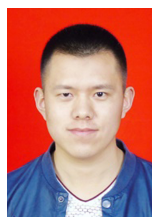
- [1] 葛文澎, 吴迪, 苗得胜, 等. 基于 CFD 的复杂地形风电机组位微地形风资源数值模拟研究 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(1): 59-64.  
GE W P, WU D, MIAO D S, et al. Numerical study on wind resource around the turbine site for real complex terrain based on CFD method [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(1): 59-64.
- [2] 左薇, 李惠民, 芮晓明, 等. 风电场典型复杂地形的数值模拟研究 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3202-3208.  
ZUO W, LI H M, RUI X M, et al. Numerical simulation of typical complex terrain of wind farm [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3202-3208.
- [3] ABDI D S, BITSUAMLAK G T. Wind flow simulations on idealized and real complex terrain using various turbulence models [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 75(9): 30-41.
- [4] UCHIDA T, OHYA Y. Numerical simulation of atmospheric flow over complex terrain [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1999, 81(1): 283-293.
- [5] DHUNNY A Z, LOLLCHUND M R, RUGHOOPUTH S D. Wind energy evaluation for a highly complex terrain using computational fluid dynamics(CFD) [J]. Renewable Energy, 2017, 101(2): 1-9.
- [6] LEE M, LEE S H, HUR N, et al. A numerical simulation of flow field in a wind farm on complex terrain [J]. Wind and Structures, 2010, 13(4): 375-383.
- [7] 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.  
SHEN J, LAI X. Numerical simulation of wind flow of wind farm under valley terrain environment [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 167-171.
- [8] BLOCKEN B, HOUT A V D, DEKKER J, et al. CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2015, 147(12): 43-57.
- [9] 刘飞虹, 吴迪, 苗得胜, 等. 发电量预测误差受地图精度的影响分析 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(1): 41-46.  
LIU F H, WU D, MIAO D S, et al. Analysis of effects of map precision on forecast error of energy production [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1): 41-46.
- [10] AVILAA M, FOLCHA A, HOUZEAUXA G, et al. A parallel CFD model for wind farm [J]. Procedia Computer Science,



- 2013, 18(5): 2157-2166.
- [11] 吴联活, 张明金, 李永乐, 等. 复杂山区地形桥址区风特性的数值模拟 [J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 915-922.  
WU L H, ZHANG M J, LI Y L, et al. Numerical simulation of wind characteristics of bridge site in complex mountainous terrain [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 915-922.
- [12] 曹文俊. 粗糙度长度综述 [J]. 气象, 1991(4): 45+47+37.  
CAO W J. A survey of roughness length [J]. Meteorological, 1991(4): 45-47+37.
- [13] 叶原君. 基于RANS模型的平衡大气边界层数值模拟 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.  
YE Y J. Numerical simulation of equilibrium atmospheric boundary layer based on RANS model [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [14] 张嘉荣, 程雪玲. 基于CFD降尺度的复杂地形风场数值模拟研究 [J]. 高原气象, 2020, 39(1): 172-184.  
ZHANG J R, CHENG X L. Numerical simulation of wind field over complex terrain based on CFD downscaling [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(1): 172-184.
- [15] 全国风力机械标准化技术委员会. 风力发电机组设计要求: GB/T 18451. 1—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
National Technical Committee of Wind Turbine Standardiza-

tion. Design requirements of wind turbine: GB/T 18451. 1-2012 [S]. Beijing: China Standards Press, 2012.

#### 作者简介:



牛亚路

牛亚路 (通信作者)

1990-, 男, 山西长治人, 风资源评估工程师, 硕士, 动力工程及工程热物理专业, 主要从事风资源评估工作 (e-mail) niuyalu@mywind.com.cn。

李岩

1991-, 男, 黑龙江牡丹江人, 风资源评估工程师, 硕士, 主要从事风资源评估工作 (e-mail) liyan03@mywind.com.cn。

王印

1994-, 男, 黑龙江绥化人, 流体力学工程师, 硕士, 主要从事流体CFD仿真工作 (e-mail) wangyin@mywind.com.cn。

(责任编辑 李辉)



复杂地形下的风机

(牛亚路)