

微地形对风速影响数值模拟研究

金启海¹, 白文博¹, 罗玉鹤¹, 杨东东¹, 王薇嘉², 陈伏彬²

¹宁波市电力设计院有限公司, 浙江 宁波

²长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2021年10月15日; 录用日期: 2021年11月1日; 发布日期: 2021年11月15日

摘要

选取中国东部沿海某山区地形为研究对象, 运用CFD数值模拟方法, 开展了微地形对风速取值的影响。结果表明, 微地形对风场的影响较大: 山脚处风速较小, 而山顶及迎风侧山坡处风速较大, 在近山顶区域会出现局部增速而后出现回流现象。所得结果可为针对微地形区域的输电线路杆塔结构风荷载设计提供参考。

关键词

数值模拟, 山地风场, 风加速效应

Numerical Simulation Study of the Influence of Micro-Topography on Wind Speed

Qihai Jin¹, Wenbo Bai¹, Yuhe Luo¹, Dongdong Yang¹, Weijia Wang², Fubin Chen²

¹Ningbo Electric Power Design Institute Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

²School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

Received: Oct. 15th, 2021; accepted: Nov. 1st, 2021; published: Nov. 15th, 2021

Abstract

The effect of micro-topography on wind speed was studied by using CFD numerical simulation method in mountainous terrain in eastern China. The results show that the micro-topography has a great influence on the wind field: the wind speed at the foot of the mountain is small, but the wind speed at the top of the mountain and the windward side of the mountain is large. What is more, near the top of the mountain, there will be a local increase and then backflow in the wind speed. The results can be used as a reference for wind load design of transmission tower-line system in the micro-terrain region.

文章引用: 金启海, 白文博, 罗玉鹤, 杨东东, 王薇嘉, 陈伏彬. 微地形对风速影响数值模拟研究[J]. 土木工程, 2021, 10(11): 1143-1151. DOI: [10.12677/hjce.2021.1011126](https://doi.org/10.12677/hjce.2021.1011126)

Keywords

Numerical Simulation, Mountain Wind Field, Wind Speed-Up Effect

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国地形复杂多样,其中尤以山地、丘陵等山区微地形为主,而输电线路作为一类风荷载敏感的结构,在风荷载作用下可能会产生显著的风效应。时下输电线路走廊愈发匮乏,跨越千里的输电线路不可避免地需要途经山区、峡谷等微地形,大风通过微地形区域时,风速和风向均会发生较大的变化,影响送电线路的安全[1]。中国是一个风灾频繁的多山地国家,台风已经在中国沿海浙江、福建、海南等地造成了大规模的铁塔倒塌事故,造成了严重的经济损失,因此,对山地风场的研究十分必要。国内外开展了许多关于山丘和山脉流场特性的研究:比如 Bowen 等人[2] [3] [4]分别研究了山体坡度、山体形状和来风方向对丘陵地形风场的影响。但现有的输电线路设计规程中,针对微地形区域的输电线路杆塔结构风荷载的设计仍较为简单或模糊。《建筑结构荷载规范》中指出了抬升地形风速修正系数计算公式,该公式考虑了山体高度、坡度等因素的影响,公式偏于概化,规范指出垭口、峡谷风道等微地形的风速修正系数为 1.2~1.5。但该规范中规定的风速修正系数范围太大,具体操作时取值上限还是下限差别很大,所以无法完全解决此问题,只能作为一种参考。

基于以上背景,从工程安全与经济角度出发,需要对微地形风场特性问题开展 CFD 数值模拟或风洞试验研究[5],以期获得符合实际风与微地形相互作用模式的风荷载计算模型。

2. 复杂地形的 CFD 建模

2.1. 模型处理及网格划分

使用地理空间数据云获取中国东部沿海某山区地形的高程数据,取样间隔 30 m。将其导入 solid works 将空间点拟合地形曲面,如图 1 所示,然后将曲面导入网格划分平台 ICEM,形成计算域。山体表面使用三角形网格划分,体网格生成过程中先在山体外围边界面生成过渡段的边界层网格,然后由过渡段向计算域的最外层流域生成结构化的空间网格,网格尺寸由内往外逐渐增大。最终,体网格采用图示混合网格,由图中可知体网格单元总数 234 万个,如图 2。

2.2. 湍流模型参数设置

本文采用 CFD 数值模拟的方法,选用 0°风向角时 10 m/s 的均匀风场及考虑 A 类地貌粗糙度的风场对该类微地形进行深入研究对比分析。

入口采用大气边界层风场的速度入口边界条件,其中均匀风场入口风速为 10 m/s; A 类风场风速剖面、湍动能和湍流耗散率采用 UDF(user-defined functions)编程实现,具体定义如下:

平均风速按指数形式表示为:

$$V(z) = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (1)$$



Figure 1. Topographic model of an eastern coastal area
图 1. 某东部沿海区域地形模型图

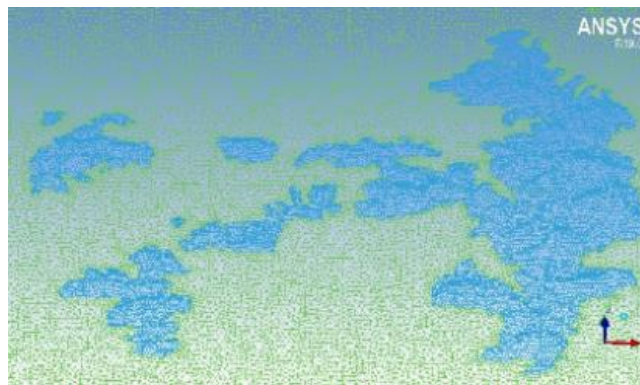


Figure 2. Grid system near terrain
图 2. 山体附近网格系统

其中, $V_{10} = 10 \text{ m/s}$, $\alpha = 0.12$ 。

对于数值风洞, $k-\varepsilon$ 模型计算的是湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程, 因此需要将上述湍流强度及积分尺度进行一定的转化。两者之间的转化关系可表示为:

$$k = \frac{3}{2}(uI_z)^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{l} \quad (3)$$

两种边界条件均可使入口处的风剖面准确地作用在山体上, 图 3, 图 4 分别给出了均匀风场风剖面自保持性及 A 类风场风剖面自保持性。

3. 数值模拟结果分析

3.1. 顺风向垭口地形形状

加速效应(speed-up effect)指在山地地形中, 某高度平均风速比平地相应高度平均风速有所增加的效应, 一般在山顶的近地面最为明显。为定量表征加速效应的大小, 定义风速比 S 为:

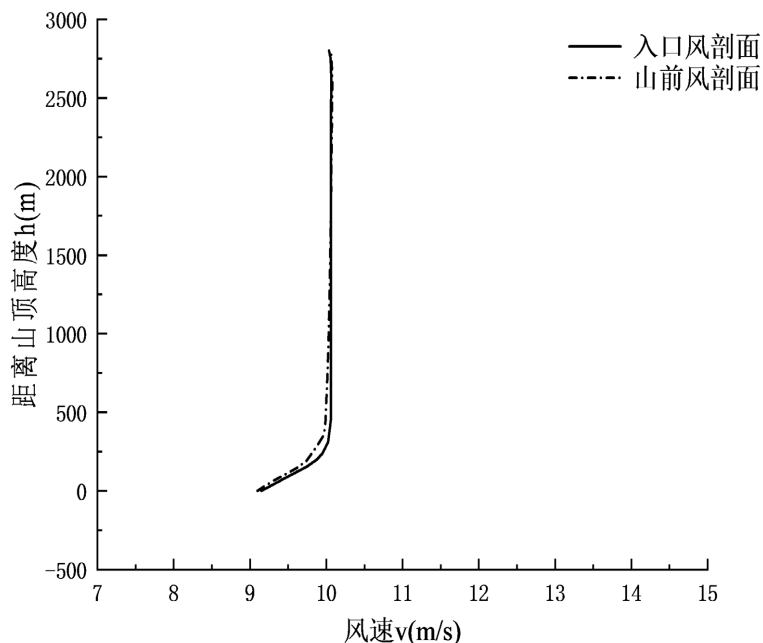


Figure 3. Validation of self-preservation of wind profile in uniform wind field
图 3. 均匀风场风剖面的自保持性验证

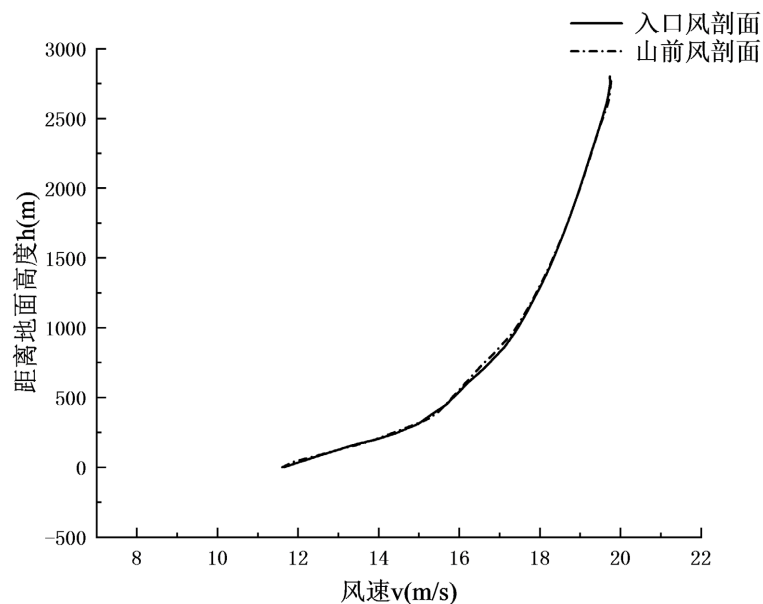


Figure 4. Validation of self-preservation of wind profile in class A wind field
图 4. A 类风场风剖面的自保持性验证

$$S(Z) = \frac{u(Z)}{u_0(Z)} \tag{4}$$

式中 $u(Z)$ 为离山体表面 Z 高度处的平均风速， $u_0(Z)$ 为来流在对应高度处的平均风速。

为了更细致地了解东部沿海区域内各小山体附近风场的变化情况，此节选取该区域内一顺风向垭口微地形风场进行分析，图 5 箭头处的山体是一个典型的顺风向垭口地形，沿 x 轴正向为顺风向。图 6 为

其尺寸示意图，由图中可看出：前方为两座连续山体 A、B，其中间的鞍部较浅。后方为一座较高的山体 C。各山体为坡度陡缓不一、成波浪形的波状斜面。

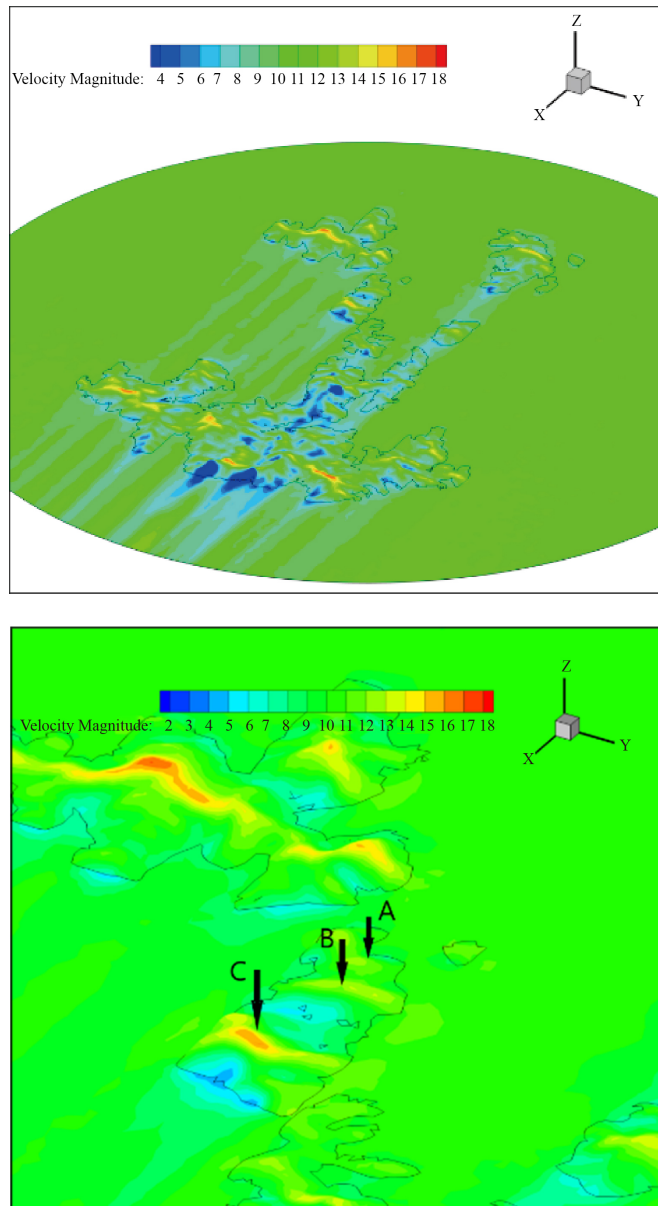


Figure 5. The terrain diagram of pass selected in the region
图 5. 区域内选取垭口地形示意图

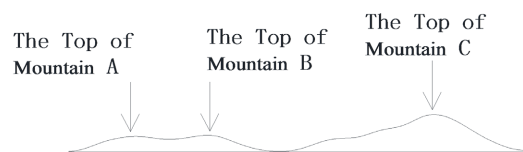


Figure 6. The shape diagram of downwind pass terrain hillside
图 6. 顺风向垭口地形山坡形状示意图

3.2. 顺风向垭口地形 CFD 结果分析

图 7, 图 8 给出了均匀风场和 A 类风场风速及风速比随高度变化情况的对比结果。结果表明, 两类风场中风速沿不同高度的变化趋势基本一致; 山脚处风速及风速比较小, 而山顶处风速比较大, 在近山顶区域会出现局部增速而后出现回流现象。山 B 与 C 之间的垭口处被山体遮挡, 风速比仅 0.5, 沿高度增高而持续增大。而 A、B 间较浅垭口风速比较大, 风速比约为 0.85, 随离山体表面距离增加而增大且趋于 1, 这说明随着顺风向垭口深度的减小, 其近垭口位置风减速效应将减弱。

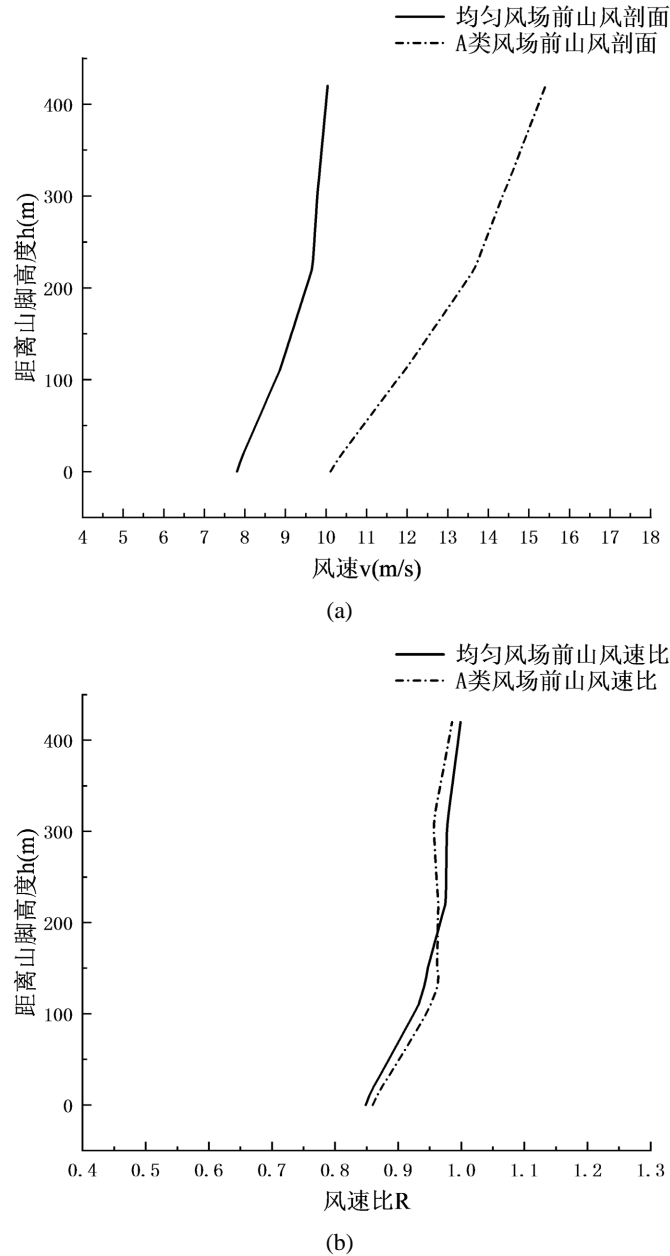


Figure 7. Comparison of wind speed and wind speed ratio with height changes of two wind fields in front of Mountain A. (a) Wind speed changes with height; (b) Wind speed ratio changes with height
图 7. 两类风场山 A 前山风速及风速比随高度变化对比。(a) 风速随高度变化对比; (b) 风速比随高度变化对比

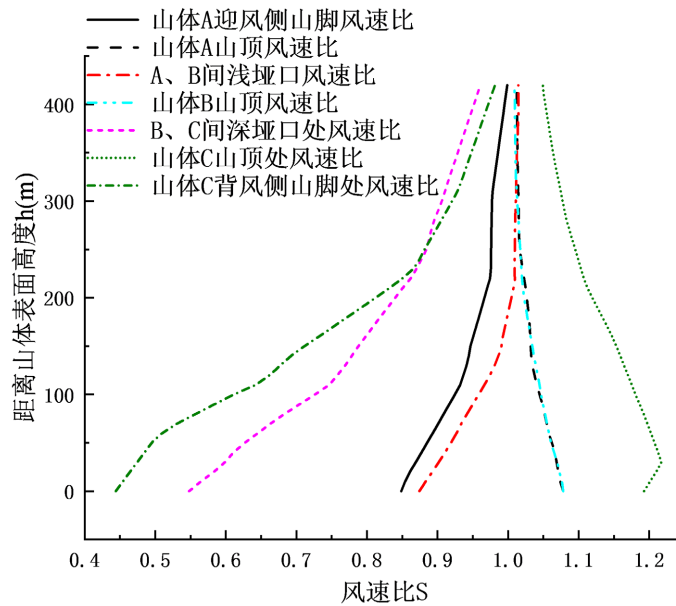


Figure 8. Comparison of wind speed ratio of lee pass with height in uniform wind field

图 8. 均匀风场背风垭口地形风速比随高度变化对比

图 9~图 12 展示了两类风场下风速沿山坡路径变化图，对比两种风场的风速爬坡情况可知，两类风场中风速沿山体坡度轨迹的变化趋势也基本一致：山坡表面风速沿山体爬坡变化规律与山坡坡度的变化轨迹基本一致，但在山坡坡度变化时，风速会出现波动。山 A 前山脚处为凹形斜面，出现了短暂的风速回流。在山坡中段凸形斜面处，风速比爬坡出现拐点，爬坡趋势随高度变化变缓。而山 B 后山坡风速比爬坡平缓，这是由于山体遮蔽效应减弱了山体坡度变化对风速爬坡影响。

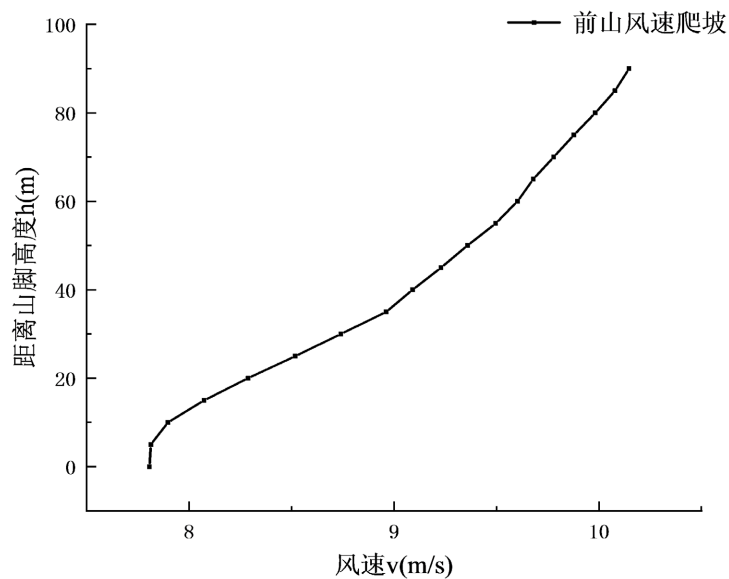


Figure 9. Wind speed climbing of the front of mountain A wind speed climbing in uniform wind field

图 9. 均匀风场山 A 前山风速爬坡

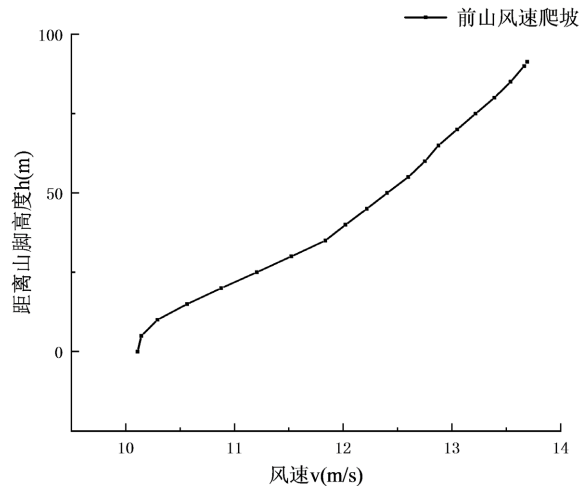


Figure 10. Wind speed climbing of the front of mountain A in class A wind field
图 10. A 类风场山 A 前山风速爬坡

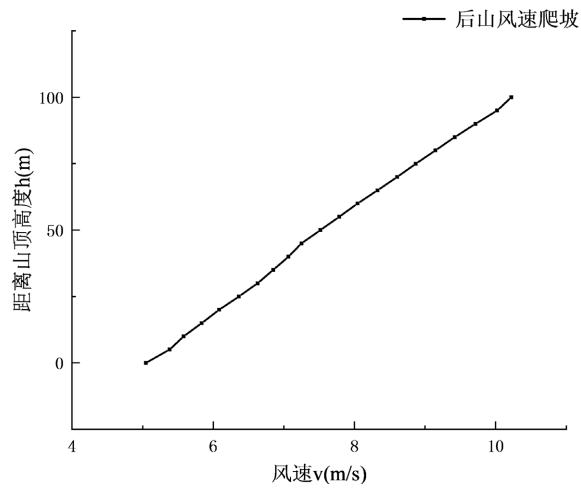


Figure 11. Wind speed climbing of the back of mountain B in uniform wind field
图 11. 均匀风场山 B 后山风速爬坡

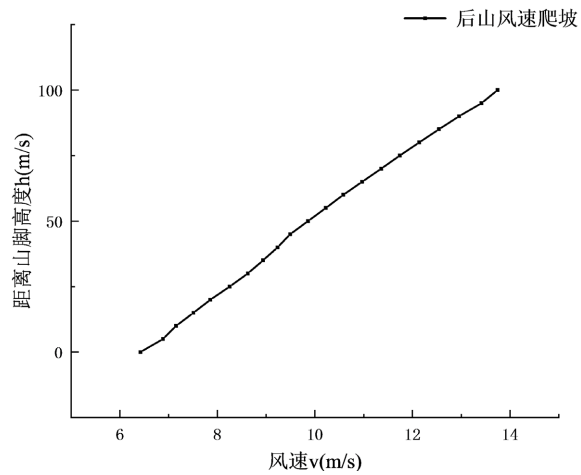


Figure 12. Wind speed climbing of the back of mountain B in class A wind field
图 12. A 类风场山 B 后山风速爬坡

4. 结论

本文运用 CFD 方法, 在 10 m/s 均匀风场及 A 类风场中, 对东部沿海地区全地形及各特殊微地形进行了数值模拟, 对比分析模拟结果, 可得到以下结论:

(1) 山体附近各位置的风场风速特性有明显差异, 一般表现为山脚处风速较小, 风速比为 0.5~0.8; 而山顶及山坡两侧处风速较大, 风速比为 1.15~1.25; 在山脚处, 风速沿高度变大的趋势较大, 而在山顶以上风速增大的趋势明显减小。

(2) 在距离山体表面 50~250 m 的近山顶处, 风速不稳定, 出现局部加速(速度比可达 1.2~1.4)后回流(速度比缓慢趋近于 1)的现象, 在 250 m 以上风剖面逐渐趋于稳定。同时, 迎风垭口处的风速也明显增大, 呈现出与山顶相似的风速回流现象。

(3) 山坡表面风速沿山体爬坡变化规律与山坡的变化轨迹基本一致, 但在山坡坡度变化时, 风速会出现波动: 在山坡凸形斜面处, 风速爬坡会出现拐点, 爬坡趋势随高度变化变缓; 山坡凹形斜面处会出现短暂的风速回流: 风速会在凹形位置附近减小约 5%~10%后再继续沿山坡增加; 在等坡度面处风速爬坡效应较为一致, 基本沿坡度上升, 无波动。另外, 山坡前、后的遮挡将减弱风速波动现象, 使风速爬坡曲线趋于平滑。

(4) 在均匀风场和 A 类风场下, 风速随高度变化趋势及风速沿山体爬坡变化规律基本一致。

基金项目

国家自然科学基金项目(51778072)。

参考文献

- [1] Dhunny, A.Z., Lollchund, M.R. and Rughooputh, S. (2017) Wind Energy Evaluation for a Highly Complex Terrain Using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Renewable Energy*, **101**, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.032>
- [2] Bowen, A.J. and Lindley, D. (1977) A Wind-Tunnel Investigation of the Wind Speed and Turbulence Characteristics Close to the Ground over Various Escarpment Shapes. *Boundary-Layer Meteorology*, **12**, 259-271.
<https://doi.org/10.1007/BF00121466>
- [3] Cao, S. and Tamura, T. (2006) Experimental Study on Roughness Effects on Turbulent Boundary Layer Flow over a Two-Dimensional Steep Hill. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **94**, 1-19.
<https://doi.org/10.1007/BF00121466>
- [4] Lubitz, W.D. and White, B.R. (2007) Wind-Tunnel and Field Investigation of the Effect of Local Wind Direction on Speed-Up over Hills. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **95**, 639-661.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.09.001>
- [5] Castellani, F., Astolfi, D., Burlando, M. and Terzi, L. (2015) Numerical Modelling for Wind Farm Operational Assessment in Complex Terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **147**, 320-329.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.016>