

输电线路所处复杂地形的风场数值模拟研究

罗啸宇, 聂铭, 谢文平, 肖凯

广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080

Numerical Simulations of Wind Flow over Complex Terrain where Transmission Lines Locate

Xiaoyu Luo, Ming Nie, Wenping Xie, Kai Xiao

Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd. Guangzhou 510080, Guangdong,

ABSTRACT: The power transmission lines are vulnerable under high intensity winds such as typhoon. To evaluate the risk of transmission lines under typhoon, it's necessary to know the exact speed of approaching wind at any location. In the paper, computational fluid dynamics method was proposed to obtain the high-resolution flow field around an actual transmission line which was attacked by typhoon. The terrain where the transmission line located was modeled. Speed-up ratio was used to evaluate the effect of the terrain on the wind. The results show that wind speed can be drastically affected by the complex terrain, and cause significantly different wind loads on each tower, which explain the collapse of towers at certain locations.

KEY WORD: Power Transmission Lines; Typhoon; Terrain; Computational Fluid Dynamics

摘要: 输电线路在强风尤其是台风作用下极易受损。为了评估线路在台风中的风险,需要确切得知线路中各个位置的风速。本文使用计算流体力学方法,对台风中受损线路所处的复杂地形进行建模,获得高分辨率的风场信息。文中使用风速比来评估地形对风场的影响,数值模拟结果显示复杂地形能够显著影响不同区域的风速大小,导致不同的输电塔所受风荷载的巨大差异,从而解释了特定区域发生倒塔事故的原因。

关键词: 输电线路; 台风; 地形; 计算流体力学

1 前言

输电线路属于风荷载敏感结构,强风尤其是台风容易导致倒塔、断线等事故,严重影响电网安全稳定运行^[1-5],我国沿海广东、福建、海南等地曾多次因台风造成大范围的倒塔事故,造成了严重的经济损失和社会影响。结构所受的风荷载主要取决于来流风的特性、地形条件、结构自身的风敏感性等因素,其中地形能够显著地改变来

流风的风场^[6]。为了研究地形对风场的影响, Jackson^[7]、Bowen^[8]、Taylor^[9]等人针对二维山峰、二维斜坡以及三维轴对称山峰等典型地形提出了风加速效应的计算方法,并被各国规范或标准所采用^[10-12]。但是这些基于典型地形的风加速效应规范很难应用到实际的复杂地形,因为实际的地形的不可避免受到周围地形的影响。因此针对实际复杂地形的风场研究,通常可采用风洞试验或数值模拟的方法。风洞试验能够模拟时变的来流风,相比于数值模拟方法,能够更好地估计风荷载的峰值。尽管如此,在复杂地形的风洞试验中,由于地形对风向的影响,测点的主风向很难预判,并且测量仪器的存在也会对风场造成一定的影响。而采用数值模拟的方法,则可以方便地获得全流场的风速信息,快速地进行参数化分析,而时间和费用成本远小于风洞试验^[13]。由于计算机性能的高速发展,基于计算流体力学(CFD)的数值模拟方法已经被广泛应用于复杂地形上空风场的分析^[14-23]。

在电力工业领域,针对复杂地形上空风场的数值模拟具有广阔的应用前景,例如风电场的选址、风机的布置等都可以通过风场数值模拟分析来进行优化设计^[24-27]。而作为电网的骨架,输电线路不可避免地会有一部分建设在山地、丘陵等复杂地形,而实际地形的风加速效应并不能简单地按照规范来计算,因此,采用数值模拟的方法能够实现线路附近风场的高分辨率分析,从而在台风来临前快速判断线路风荷载较大的危险点,或是用于灾后分析倒塔事故发生的原因。

2 强台风“天鸽”中受损线路

2017 年, 强台风“天鸽”(编号 1713) 登录我国广东地区, 根据气象部门的记录, 登录过程中的最大瞬时风速达到了 51.9m/s。“天鸽”给珠海的电力设施造成严重损坏, 110kV 及以上线路发生多起倒塔事故。图 1 所示为某 110kV 线路中倒塌的 21#、22#塔, 塔高分别为 24m、21m。该线路折算到 10m 高度的设计风速为 32.8m/s。图 2 所示为该线路所处地形的数字高程图, 从图中可以看出该线路起于东北方向的一处山地, 经过一段平坦的地面之后, 又经过一处丘陵, 如图 3 所示, 21#、22#塔正好位于该区域, 其中 21#塔处于两座山峰中间的山脊上, 而 22#塔则几乎处于山顶的位置。从图 2-3 可以看出, 21#、22#所处位置的风场既受到自身所处山地的影响, 也处于周边山地的影响范围之内。为了分析 21#、22#发生倒塔的原因, 本文从风荷载的角度出发, 通过对复杂地形进行风场的数值模拟, 分析地形对风速的影响。本文中地形对风的加速效应使用风速比 $R = U(z)/U_{boundary}(z)$, 来表示, 其中 $U(z)$ 是距离地表高度 z 的风速, $U_{boundary}(z)$ 为距离地表高度 z 的来流风速, 即入口风速。



a. 21#塔



b. 22#塔

图 1. 强台风“天鸽”中某线路受损的输电塔
Fig.1 Power transmission towers collapsed in severe typhoon Hato

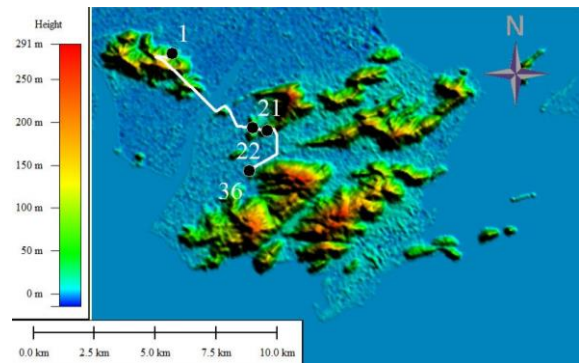


图 2. 受损线路所处地形的数字高程地图
Fig.2 Digital Elevation Map (DEM) of the terrain where the transmission line locate.

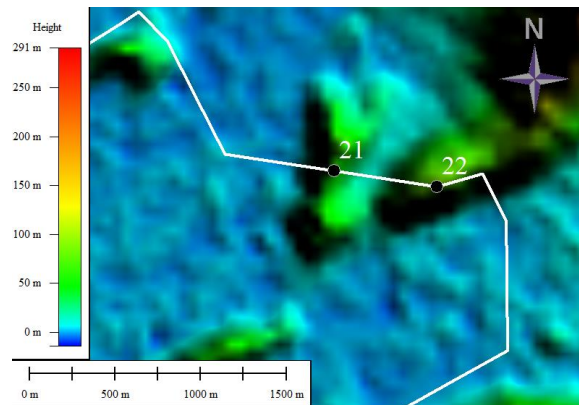


图 3. 数字高程图局部放大图
Fig.3 Partial enlarged drawing of DEM.

3 流场建模

3.1 控制方程

在众多湍流模型中, SST $\kappa - \omega$ 模型可以较好地预测流体的平均速度以及壁面切应力, 同时对计算资源的要求较低^[28]。本文针对风场模拟采用的可压缩流的雷诺平均方程可表示为:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

式中 U_i 和 u_i 分别为 x_i 方向的平均风速和脉动风速; p 为气压; ρ 和 ν 分别 空气密度和粘度。

为了使方程封闭, 式 (2) 中的雷诺应力张量 $-\overline{u_i u_j}$ 可使用 Boussinesq 近似, 通过平均应变张量 S_{ij} 来表示:

$$-\overline{u_i u_j} = 2\nu_t S_{ij} - (2/3)\kappa\delta_{ij}, \quad S_{ij} = (1/2)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$$

式中 ν_t 代表湍粘性; κ 为湍动能; δ_{ij} 为 Kronecker 增量。

在 SST $\kappa - \omega$ 模型中, 湍流切应力通过下式来考虑:

$$\nu_t = \frac{\alpha\kappa}{\max(\alpha\omega, S_{ij}F_s)}$$

$$F_s = \tanh[(\max(\frac{2\sqrt{\kappa}}{\beta^*\omega z}, \frac{500\nu}{z^2\omega}))^2]$$

式中 F_s 是为了限制湍流粘度而引入的方程。

至此, κ and $\omega(=\varepsilon/\kappa)$ 的输运方程可以由下式表示:

$$\frac{\partial(U_i\kappa)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma^*\nu_t) \frac{\partial\kappa}{\partial x_j} \right) - \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^*\kappa\omega$$

$$\frac{\partial(U_i\omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right) - \alpha(\omega/\kappa)\overline{u_i u_j} \frac{\partial(U_i\kappa)}{\partial x_j} - \beta\omega^2$$

式中 $\alpha(=5/9)$ 、 $\beta(=0.075)$ 、 $\beta^*(=0.09)$ 、 $\sigma(=0.5)$ 和 σ^* 为模型中的常量。

3.2 模型设置

图 4 所示为受损线路所处实际地形的计算模型, 进行网格无关性分析后采用的水平网格大小为 50m。高度方向网格数量为 50, 网格按 1.15 的比例从地面增长。正北方向的来流风向定义为 0° , 本文以 30° 为间隔, 共计算了 12 个风向下的风场。

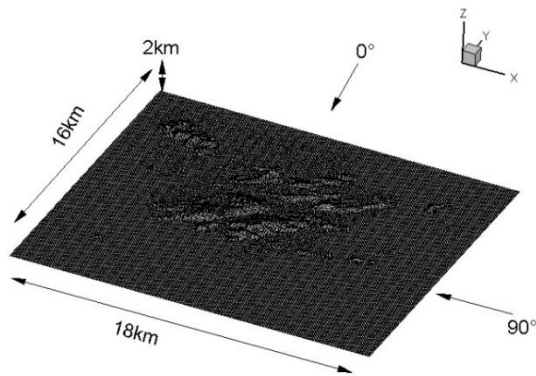


图 4. 地形数值模型的设置

Fig.4 Configuration of numerical model simulating the terrain.

3.3 边界条件

参照我国建筑结构荷载规范中^[12]的规定, CFD 模型的入口风速采用 B 类地貌的指数率风剖面形式, 如图 5 所示, 地面为非滑移壁面边界, 顶面为对称边界, 侧面及出口均采用速度出口。

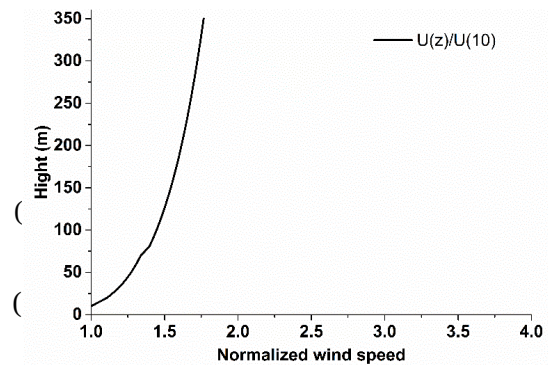


图 5. 入口处的风剖面

Fig.5 Normalized wind speed for the inlet

3.4 求解设置

CFD 模型的求解基于商用软件 ANSYS/Fluent 18.0, 求解方法为有限体积法。压力速度之间的解耦采用收敛速度更快的 SIMPLEC 算法。压力的空间离散采用二阶迎风格式。动量的空间离散采用精度更高且具有守恒特性的 QUICK 格式。

4 结果分析

图 6 所示为计算区域离地表 20m 高度的风速比云图, 从图中可以看到由于地形的影响, 风速比的分布差异巨大, 有些区域最大风速比达到 1.8, 而在有些区域则远远小于 1。显然, 风速在山地的迎风面被逐渐加速, 而在背风面则逐渐减速, 该区域内最大的风速比正是出现在最高的山峰。

对于受损的线路而言, 该线路的大部分区域因为地形所导致的风加速效应都不明显。在某些风向角下, 由于上游的山地给下游线路造成了一定的遮蔽效应, 从而显著减小了来流风的大小。有些区域甚至在各个风向下, 风速比均没有超过 1。然而从图 6、7 中仍然可以看到, 22#塔所处位置的风速比显著大于线路中其他杆塔, 尤其是在 30° 和 210° 风向角下。当风向为 30° 时, 21#塔和 22#塔均处于山的背风面, 风速都是从山顶的最大值逐渐降下来, 然而 22#塔的风速比依然达到了 1.45, 而 21#塔的风速比小于 1, 这是由于 22#塔所处的海拔高度更高, 而且其接近于山顶, 该山

顶一方面给 21#塔提供了良好的遮蔽, 另一方面导致了 22#所处位置风的加速效应。当风向为 210° 时, 21#塔和 22#塔均处于山的迎风面, 22#塔所在点的风速比达到了 1.49, 而此时 21#塔所在点的风速比仍然小于 1, 这是由于该塔北面的山顶提供了遮蔽。

图8所示为21#塔和22#塔所在点在各个风向下的风速比, 从图中可以看出 21#塔所在点各个方向下的风速比均小于 1, 最大仅为 0.95。地形的加速效应对 22#最为显著, 在多个风向下均大于 1。尽管如此, 由于西北方向山地的遮蔽, 该点在 270° 、 300° 、 330° 风向角下的风速比均较小。

在强台风“天鸽”中, 该线路中 36 基塔只有

21#、22#塔发生了倒塌, 根据附件气象站的监测数据, 台风登陆后风速在风向 0° ~ 30° 之间达到最大, 约为 30m/s。根据本文中的风速比结果, 可以看出由于地形对风场的影响, 整条线路中 22#塔在该风向变化区间所受的风荷载最大, 达到 1.17-1.45 之间, 并且显著大于 21#塔, 可以判断极有可能是 22#塔首先发生了倒塌。

从图 9 中 22#塔所在点的垂直风剖面可以看出, 由于地形的影响风速比从地表逐渐增加, 随后又逐渐减小, 这显示在高度方向上风速比并不是均匀一致的。

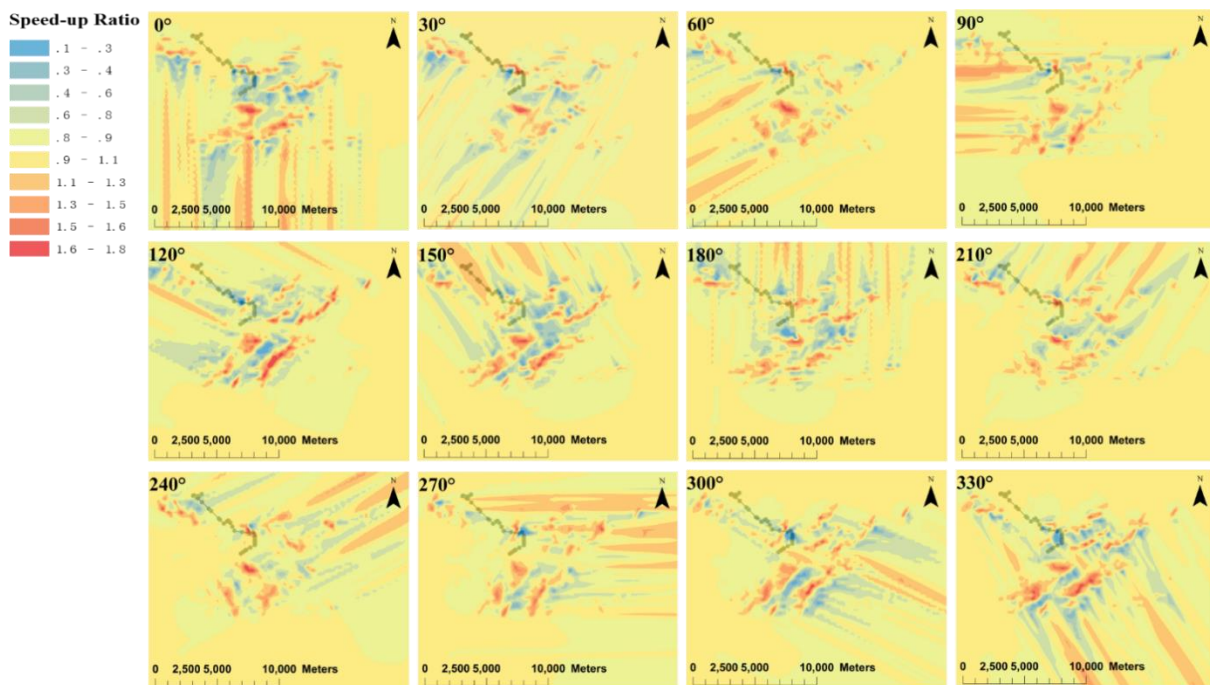


图 6. 离地 20m 高度处各个方向的风速比

Fig.6 Wind speed-up ratio for 12 different wind directions at the height of 20m.

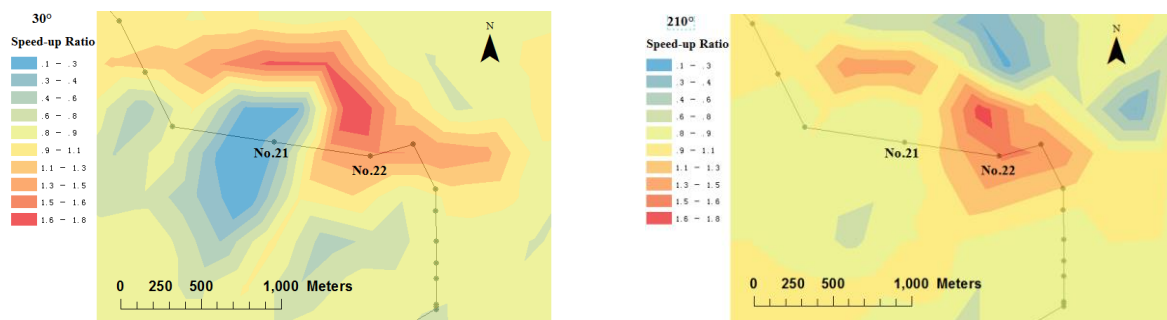


图 7. 30° 和 210° 风向角下离地 20m 高度处风速比

Fig.7 Wind speed-up ratio for 30° and 210° at the height of 20m.

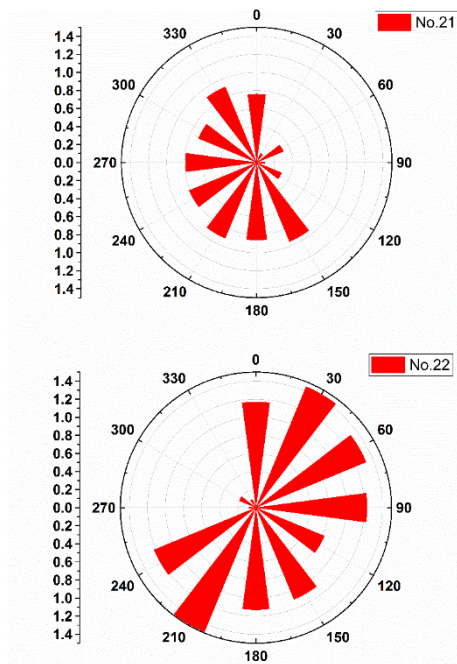


图 8. 21# 和 22# 塔的所处位置离地 20m 高度处风速比
Fig.8 Speed-up ratio at the height of 20m for transmission tower No.21 and No.22

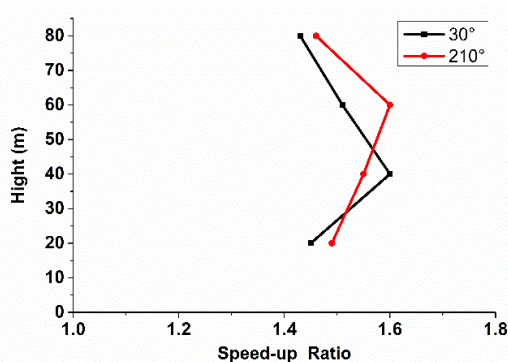


图 9. No.22 塔所处位置高度方向风剖面
Fig.9 Vertical profiles of wind speed-up ratio above the ground of tower No.22.

5 结论及未来的工作

本文对强台风“天鸽”中受损线路周边的风场进行了数值模拟，分析了复杂地形对风场所产生的影响。结果显示 22#塔所周边的地形对该点的来流风产生了显著的加速效应，而对同样倒塌的 21#塔带来了遮蔽效应。从风荷载的角度看，22#塔在大多数风向角下的风速比均显著大于 21#塔，且在实际的台风风向下，风速比达到 1.17-1.45 之间，从而推断 22#塔由于风荷载超限而倒塌，并进而导致 21#塔受到倒塔产生的拉力而发生破坏。

从本文结果可以看出复杂地形能够剧烈地改变风的流场分布，而对复杂地形的数值模拟可以获得输电线路附近高分辨率的风场信息，由于能够确切知道任意点的风速风向数据，可以实现台风来临前输电塔的风险性评估和预警，也可以用于灾后的事故分析。

本文中分析了输电塔所在点的风速比分布，尚未考虑导线荷载，在未来的应用中，针对特定情况也需对导线所在段的风速比进行考虑。

致谢

本文研究工作由广东电网有限责任公司科技项目（GDKJQQ20153005）资助。

参 考 文 献

- [1] E. Savory, H. Hangan, A.E. Damatty, et al. Modeling and prediction of failure of transmission lines due to high intensity winds. Structures Congress 2008, Crossing Borders ASCE, 2008.
- [2] T.W. LI, S. Jiang, J. Zhao, et al. Wind accident analysis of transmission line in China Southern Power Grid's Coastal Regions. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies IEEE, 2016:1700-1704.
- [3] W.S. Gao, R. Zhou, D. Zhao. Heuristic failure prediction model of transmission line under natural disasters. Iet Generation Transmission & Distribution 11.4, 2017, 24(3):935-942.
- [4] 张宏杰, 杨靖波, 杨风利, 等. 台风风场参数对输电杆塔力学特性的影响[J]. 中国电力, 2016, 48(2):41-47.
- [5] 厉天威, 江巴彦, 赵建华, 等. 南方电网沿海地区输电线路风灾事故分析[J]. 高压电器, 2016(6):23-28.
- [6] 郑焘, 李晴岚, 王兴宝, 等. 台风对深港局地风影响数值模拟及地形敏感性试验. 气象, 2018(3):361-371.
- [7] P. S. Jackson, J.C.R Hunt, Turbulent flow over a low hill. Journal of the Royal Meteorological Society, 1975, 101: 929-955.
- [8] A.J. Bowen. The prediction of mean wind speeds above simple 2D hill shapes. Wind Engineering 1983, Part 3C. 1984: 259-270.
- [9] J.L. Walmsley, P.A. Taylor, J.R. Salmon. Simple guidelines for estimating windspeed variations due to small-scale topographic features—an update. Climatological bulletin, 1989, 23(1): 3-14.
- [10] ASCE7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE, 2010.
- [11] Architectural Institute of Japan, Recommendations for loads on building, AIJ, 2004.
- [12] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范. 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] K. Cho, S. Hong. Speed up effects over 3-D complex hills with transmission towers collapsed during typhoon passage. JWE, 2006 (108): 451-454.
- [14] H. Hangan, M. Refan, C. Jubayer, et al. Novel techniques in wind engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 171: 12-33.
- [15] Jubayer, Chowdhury Mohammad, and H. Hangan. A hybrid

- approach for evaluating wind flow over a complex terrain. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 175(2018):65-76.
- [16] H.G. Kim, V.C. Patel, C.M. Lee. Numerical simulation of wind flow over hilly terrain. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2000, 87(1): 45-60.
- [17] J. Franke. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. *Meteorological Inst.*, 2007.
- [18] G.T. Bitsuamlak, T. Stathopoulos, C. Bédard. Numerical evaluation of wind flow over complex terrain. *Journal of Aerospace Engineering*, 2004, 17(4): 135-145.
- [19] M. Burlando, L. Carassale, E. Georgieva, et al. A simple and efficient procedure for the numerical simulation of wind fields in complex terrain[J]. *Boundary-layer meteorology*, 2007, 125(3): 417-439.
- [20] B. Blocken, A. Hout, J. Dekker, et al. CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147: 43-57.
- [21] Z. Liu, T. Ishihara, X. He, et al. LES study on the turbulent flow fields over complex terrain covered by vegetation canopy. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 155: 60-73.
- [22] 徐海巍, 楼文娟, 李天昊, 等. 微地形下输电线路跳线的风偏分析. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(2):264-272.
- [23] G. Huang, X. Cheng, L. Peng, et al. Aerodynamic shape of transition curve for truncated mountainous terrain model in wind field simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 178: 80-90.
- [24] M. Lee, S.H. Lee, N.Hur, et al. A numerical simulation of flow field in a wind farm on complex terrain. *Wind and Structures*, 2010, 13(4): 375.
- [25] M.X. Song, K. Chen, Z.Y. He, et al. Optimization of wind farm micro-siting for complex terrain using greedy algorithm. *Energy*, 2014, 67(4):454-459.
- [26] F. Castellani, D. Astolfi, M. Burlando, et al. Numerical modelling for wind farm operational assessment in complex terrain. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2015, 147:320-329.
- [27] X. Tang, Q. Yang, K. Wang, et al. Optimisation of wind farm layout in complex terrain via mixed-installation of different types of turbines. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(9): 1065-1073.
- [28] J.B.R. Loureiro, A.T.P. Alho, A.P.S. Freire. The numerical computation of near-wall turbulent flow over a steep hill. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(5):540-561.

收稿日期:

作者简介:

罗啸宇(1986-), 男, 湖北黄冈, 博士, 研究方向为数值仿真及电网防灾减灾技术, Email:lxys86@163.com。