

# 基于 OpenFOAM 的典型复杂地形流场演变

曹晓焱, 许 昌, 程 哲, 韩星星, 薛飞飞  
(河海大学, 江苏 南京 211100)

**摘 要:** 随着平坦地形资源的消耗殆尽, 风电场选址逐渐转向复杂地形。复杂地形具有与平坦地形截然不同的地理特征条件, 地形起伏造成了流场的复杂流动, 风规律特性也不尽相同, 因此研究复杂地形流场分布规律对风电场微观选址、风功率预测等具有重要意义。文章首先基于 OpenFOAM 开源软件, 搭建了复杂地形几何模型和数值模拟方法, 研究分析适用于复杂地形的网格、边界条件以及湍流模型; 然后, 结合 Askervein 山地真实测量数据对比分析复杂地形数值模型的可靠性; 最后, 求解孤峰、台地和峰丛等典型复杂地形的流场分布, 研究坡度和坡高对不同地形流场的影响。研究发现: 不同地形均满足雷诺数无关性原则; 在孤峰地形中, 坡度越大对山体后方回流区的影响越明显; 而台地地形流场受坡高变化的影响更大; 峰丛地形在不同坡度和坡高情况下的流场发展情况一致, 相比于坡度, 其受坡高变化的影响更大。研究得到的流场特征值分布范围可为复杂地形风电场微观选址和风功率预测提供参考。

**关键词:** 数值模拟; OpenFOAM; 孤峰; 峰丛; 风电场

**中图分类号:** TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)02-0208-09

## 0 引言

我国复杂地形约占全国土地面积的 33%, 复杂地形的流场研究是风资源评估的难题, 空气流过复杂地形会产生复杂的流动分离和交汇, 因此深入研究孤峰、台地、峰丛等典型复杂地形的流场分布规律对山地风电场微观选址具有重要意义。

随着计算能力的发展, 计算流体力学(CFD)在复杂地形流场模拟中得到了广泛的应用。在湍流模型选取方面, 主流研究主要采用雷诺时均法(RANS)和大涡模拟法(LES)。LES对网格分辨率要求较高, 当网格分辨率不够时, 其模拟出的风电场空气动力场准确度较低。文献[1]对 Askervein 山体绕流进行了模拟研究, 认为标准  $k-\varepsilon$  湍流模型能较好地预测迎风面的流动情况。文献[2]在文献[1]的基础上利用改进  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟了复杂地形风电场大气边界层流动, 模拟数据与实验数据吻合。

在模型搭建方面, 使用开源流场计算软件 OpenFOAM 实现模拟复杂地形流场演变所需的各种边界条件、控制方程组和求解器<sup>[3]</sup>。在早期的商用软件 FLUENT 和 CFX 中, 难以在顶层边界施加风速和湍流耗散率的梯度边界, 须要通过对贴近

顶层的网格施加雷诺应力或耗散率通量等方式间接实现<sup>[4]</sup>, 而 OpenFOAM 则直接提供了梯度边界条件类型, 在少量修改后就可实现风速和湍流耗散率的梯度边界条件。

目前已开展的山地绕流研究大多局限于孤峰地形, 针对台地、峰丛地形的绕流研究较少, 对复杂地形具化的结论也较少。因此, 本文提出了在中性条件下基于 RANS 方法的山地流场模拟方法, 并采用 Askervein 山地流场来验证模型的可靠性; 在此基础上, 分析了孤峰、台地和峰丛 3 类典型地形不同坡高和坡度尺寸下的流场演变特性, 得出的流场特征值分布可为复杂地形风电场微观选址提供参考。

## 1 几何模型与计算方法

### 1.1 几何模型

采用余弦控制方程来模拟孤峰的形状<sup>[5]</sup>。

$$z(x, y) = H \cos^2 \left[ \frac{\pi(x^2 + y^2)^{1/2}}{2L} \right] \quad (1)$$

式中:  $H$  为孤峰高度;  $L$  为山顶处到高度  $H/2$  处的水平距离。

复杂地形的平均坡度分为  $0 \sim 15^\circ$ ,  $15 \sim 25^\circ$ ,  $25 \sim 35^\circ$ ,  $35^\circ$  以上, 相对高度分为  $30 \sim 200$  m,  $200 \sim$

收稿日期: 2024-01-27。

基金项目: 国家自然科学基金(52106238); 江苏省政策引导类计划(BZ2021019); 中央高校基本科研业务费专项资金(B230201051)。

通信作者: 许 昌(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为风能利用理论与技术。E-mail: zhuifengxu@hhu.edu.cn

500 m, 500~1 000 m, 1 000 m 以上, 考虑到计算资源的有限性, 各类典型复杂地形的计算模型构造见表 1。

表 1 地形的计算模型构造

Table 1 Construction of the computational model for the terrain

编号	地形类型	高度/m	坡度/(°)
dX1	孤峰	300	10
dX2	孤峰	300	20
dX3	孤峰	300	30
dX4	孤峰	100	20
dX5	孤峰	500	20
dX6	台地	50	10
dX7	台地	50	30
dX8	台地	200	30
dX9	峰丛地形(L=1 134)	200	10
dX10	峰丛地形(L=549)	200	20
dX11	峰丛地形(L=274)	100	20
dX12	峰丛地形(L=137)	50	20

峰丛地形中, 相邻两峰顶的间距为  $2L$ , 典型复杂地形的山体轮廓如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

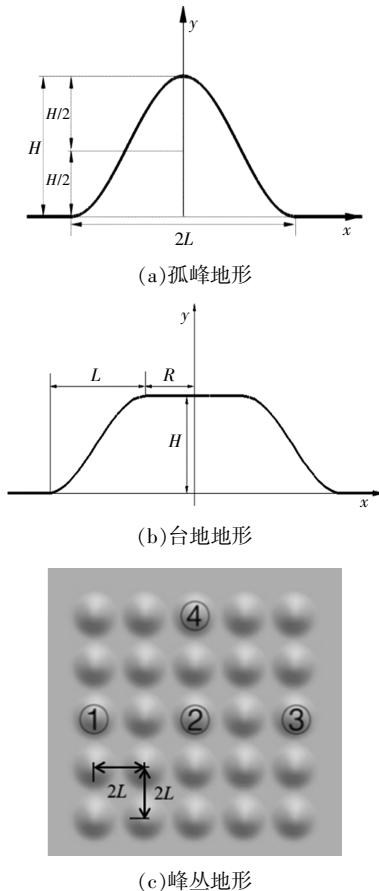


图 1 典型复杂地形山体轮廓

Fig.1 Profile of a typical complex terrain mountain

## 1.2 湍流模型

对于沿主流方向垂直平面内的流动, 在不考虑风力机作用力、气压梯度力和科氏力的影响并忽略分子粘度( $\mu \leq \mu_t$ )时<sup>[7,8]</sup>:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_t \frac{\partial U}{\partial z} \right) = -\rho \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \quad (2)$$

式中:  $\mu_t$  为湍流粘度。

在近地面层  $\partial \overline{u'w'}/\partial z \approx 0$ , 当湍流模型能够模拟出合理的湍流粘度时, 风速将自动保持水平均匀性, 即  $DU/Dt=0$ 。

均衡条件下湍流控制方程组可简写为

$$0 = \rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \rho \varepsilon - S_{k,ASL} \quad (3)$$

$$0 = \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + (C_{\varepsilon 1} P - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} B) \frac{\varepsilon}{k} \quad (4)$$

$$P = \mu_t \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \quad (5)$$

式中:  $P$  为瞬时均梯度造成的湍流动能生成率;  $B$  为浮升力引起的湍流动能生成率;  $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}$  均为常数;  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  分别为  $k$  和  $\varepsilon$  的 Prantl 数。

## 2 边界条件与网格划分

### 2.1 边界条件

在进行大气边界层流动数值模拟时, 边界条件、湍流模型及相关参数之间应该互相协调来保证入流均匀性<sup>[9,10]</sup>。本文采用中性边界大气层模型, 其速度入口边界为<sup>[11]</sup>

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} = \frac{3}{2} \sigma^2 \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_0)} \quad (8)$$

式中:  $u_*$  为摩擦速度;  $\kappa$  为冯卡门常数, 一般取 0.4187<sup>[12]</sup>;  $z$  为离地高度;  $z_0$  为大气粗糙度长度;  $\sigma$  为风速标准差;  $C_\mu$  在 ABL 条件下一般取值 0.033<sup>[13]</sup>。

出口边界设置为自由出流,  $\partial \phi / \partial x = 0, \phi \in \{U, \varepsilon, k\}$ 。沿流动方向两侧面边界设置为对称边界条件,  $u_y = 0, \partial \phi / \partial y = 0, y \in \{U, \varepsilon, k\}$ 。底面采用 OpenFOAM 壁面函数中的 nutWallFunction [式(9)], kqRWallFunction (实际为 zeroGradient), epsilonWallFunction [式(10)] 分别对湍黏系数、湍动能、湍

流耗散率进行边界设置,速度底面采用无滑移边界条件,顶部采用滑移边界。

$$(y_p^+)_0 = y_\lambda^+, (y_p^+)_{n+1} = \frac{\kappa Re + (y_p^+)_n}{\ln[E(y_p^+)_n] + 1},$$

$$(\nu_t)_p = \nu \left[ \frac{y_p^+ \kappa}{\ln(E y_p^+)} - 1 \right] \quad (9)$$

式中: $y_p^+$ 为流场内一点到壁面的无量纲化距离; $y_\lambda^+$ 为黏性底层的临界 $y^+$ ; $\nu$ 为运动黏度; $\nu_t$ 为涡黏系数; $Re$ 为雷诺数。

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{0.75} k_p^{1.5}}{\kappa y_p}, G_p = (\nu + \nu_t) \frac{|u_p - u_w|}{y_p} C_\mu^{0.25} \frac{\sqrt{k_p}}{\kappa y_p} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_p$ 为湍流耗散率; $C_\mu$ 取0.033; $k_p$ 为壁面湍动能值。

### 2.2 网格划分

以地形 dx1 为例,孤峰中心为上、下游区分界线,上、下游各取  $17H$  ( $H$  为山丘高度),计算域大小为  $(34H \times 32H \times 5H)$ ,  $x$  (水平),  $y$  (垂直) 和  $z$  (竖直) 方向网格均匀划分,  $x$  和  $y$  方向网格尺度为  $d$ ,  $z$  方向网格尺度为  $d/2$ , 利用加密程序在山丘表面加密网格。考虑到未添加风机, 保证地形区域部分的网格大小为  $5\text{ m}$  即可, 网格划分结果如图 2, 3 所示。其他地形划分方法与 dx1 相同。

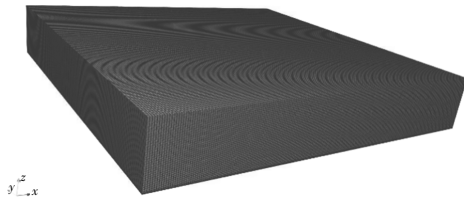


图2 全尺度网格示意图

Fig.2 Full-Scale grid visualization

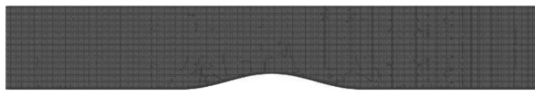


图3 切面网格示意图

Fig.3 Slice grid visualization

图4为网格无关性测试结果。共比较了  $d$  取 45, 50, 55, 60 m 时的离地 120 m 处的风速情况, 总网格数量分别为 1 100 万、850 万、650 万和 550 万。

由图4可知, 4种网格尺度的计算差异较小。网格的精细化会导致计算资源耗费的增多, 为了便于后处理中捕捉涡流等微小变化, 本文选择较

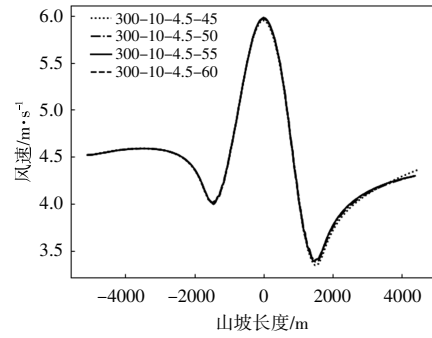


图4 网格无关性测试结果

Fig.4 Test results for three different grid scales

细的网格尺度,  $d$  取  $50\text{ m}$ 。

### 2.3 Askervein 山地验证

Askervein 山地实验是比较著名的复杂地形风场的测量实验之一, 图5为 Askervein 地形与入流方向。

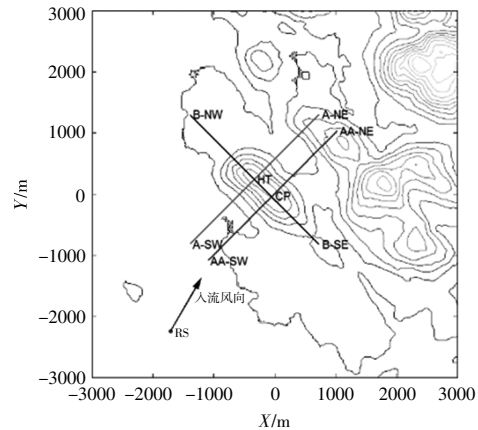


图5 Askervein 地形与入流方向

Fig.5 Askervein topography and inflow direction

文献[13, 14]将观测点布置在图中 A-A, AA-AA 及 B-B 这 3 条线上, 获得风速和湍流的实测数据。本文采用 A-A 线上的测量数据和模拟数据进行对比分析, 以风加速因子和湍流强度为特征值, 验证数值计算模型的准确性。风加速因子  $\Delta S$  表征地形对速度的效应, 表达成某一位置风速与其上游入口同一离地高度风速的相对增加量。

$$\Delta S = \frac{U(x, \Delta z) - U_0(\Delta z)}{U_0(\Delta z)} \quad (11)$$

式中:  $U(x, \Delta z)$  为水平坐标为  $x$  距离地面  $\Delta z$  处的风速;  $U_0(\Delta z)$  为  $U(x, \Delta z)$  同一离地高度对应的入口风速。

图6为  $\Delta S$  示意图。

模型验证采用的实测数据来源于 TU-03B号。

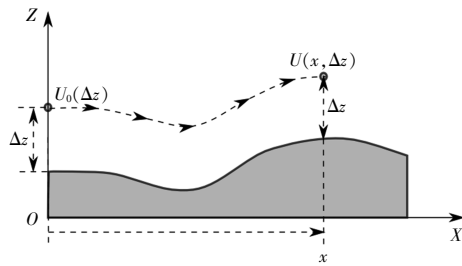
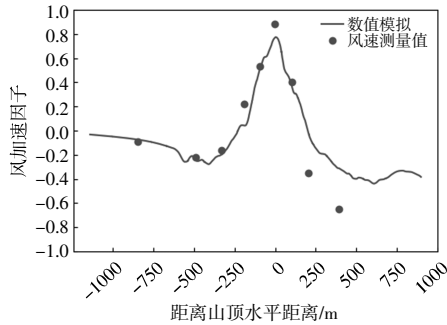


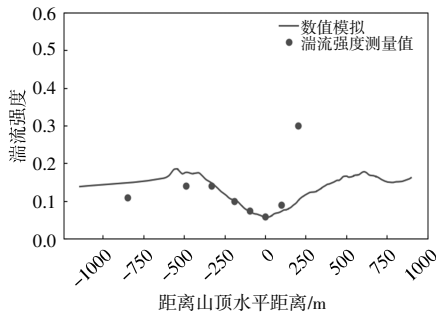
图6 风加速因子示意图

Fig.6 Wind acceleration factor diagram

测量时长为 3 h,测量期间风速较大且处于中性大气边界层条件下,测站 RS 处的平均风速为 8.9 m/s,入流风向角为 210°。文献[1]拟合出摩擦风速和大气边界层的粗糙度, $u_*$  为 0.611 m/s, $z_0$  为 0.03 m。按照上述入流条件模拟 Askervein 山地绕流,测量值与模拟值如图 7 所示。



(a) 风加速因子对比



(b) 湍流强度对比

图7 数值模型测试结果

Fig.7 Numerical model test results

由图 7 可知,本文采用的 RANS 湍流模型略微低估了山顶的风加速效应和山后的湍流强度,高估了尾流的恢复速度,但整体趋势一致,模拟值与测量值吻合度较高,表明该模型可以较好地模拟出复杂地形的流场分布情况。

### 3 地形流场模拟结果与分析

本文主要讨论坡度、坡高对典型复杂地形流场分布的影响。入口的参考风速设置为 4.5,5.5,

6.5 m/s,下垫面的粗糙度设置为 0.3。图 8 为 dX1 地形在不同入流风速下离地 120 m 的  $\Delta S$  分布。

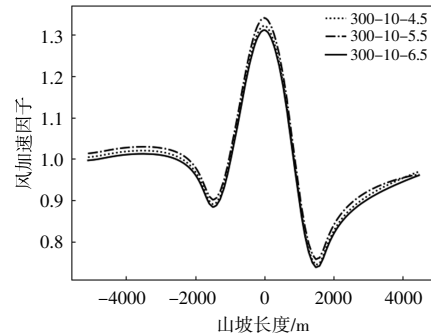
图8 dX1 地形在不同入流风速下离地 120 m 的  $\Delta S$  分布

Fig.8 Wind acceleration factor at 120 m in the dX1 terrain for different inflow wind speeds

由图 8 可知,在风向相同而风速不同时,风电场任意位置处的风速比例关系不变,验证了风加速的雷诺数无关性<sup>[15]</sup>。2022 年全国新增装机的风电机组中,平均轮毂高度为 110 m,最大轮毂高度为 170 m,考虑到轮毂高度的发展趋势,本文将关注的高度设为离地 120 m。以地形中心为原点,沿来流风向原点上方为上风向,下方为下风向,考虑雷诺数无关性原则,以下流场模拟仅展示 4.5 m/s 入流风速下的离地 120 m 处的风速云图和图谱。

#### 3.1 孤峰地形流场分析

图 9~12 分别为孤峰地形离地 120 m 处的风资源分布图和风速对比图。气流在孤峰迎风面山脚处受逆压梯度作用,边界层迅速增大并出现较小的减速区。气流因受到地形挤压而沿山丘表面爬升产生加速,风速在迎风坡面随山坡高度的升高而增大,在山顶处达到最大值。而山顶处湍流较小,山顶的边界层因风加速作用而变得非常薄,使得高速区位于边界层之上。背风面的风速随着山坡高度的降低而不断减小,并在孤峰背风面及下游形成一个较大的低速区,且该低速区内湍流

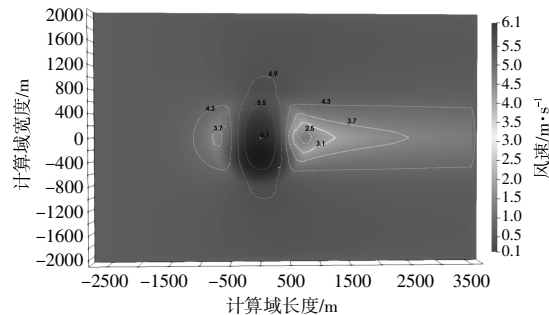


图9 dX2 地形流场分布图

Fig.9 Distribution of the flow field in the dX2 terrain

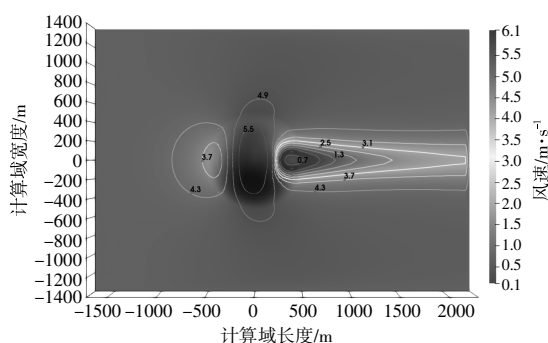


图 10 dX3 地形流场分布图

Fig.10 Distribution of the flow field in the dX3 terrain

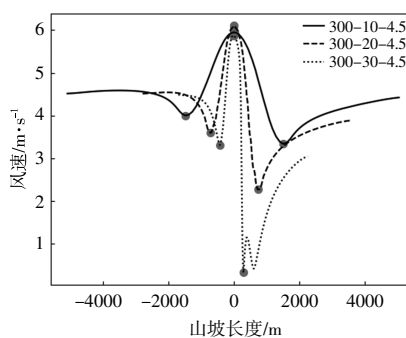


图 12 不同坡度孤峰地形下风速对比

Fig.12 Wind speed comparisons at an isolated peak of different slopes

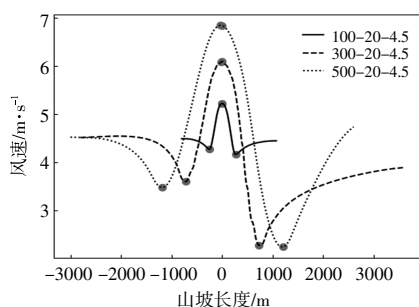


图 11 不同坡高孤峰地形下风速对比

Fig.11 Wind speed comparisons at an isolated peak of different heights

强度很大。

由图 9~12 可知, 风速随着坡度的增大而减小, 其中 dX3 在背风面坡脚处产生回流, 产生负风速。一般认为, 在中性大气边界层条件下, 当山丘的坡度  $S$  大于 0.4 时, 流动开始发生分离, 坡度越大, 越容易产生回流区。

表 2 为孤峰地形上风向和下风向风速最大、最小和风速等值点。

综合图 11, 12 及表 2 可知: 风速最大值普

表 2 孤峰地形上、下风向风速最大、最小和风速等值点

Table 2 The table of maximum, minimum, and isopleth points of wind speed of isolated peak topography in upwind and downwind direction

类型	入流风速/ $m \cdot s^{-1}$		$x_{min}$		$u_{min}$		$x_{max}$		$u_{max}$		风速等值点	
	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向
dX4	4.5	4.5	-259.1	274.7	4.5	4.4	-2.1	0.4	5.5	5.5	-249.0	230.0
dX4	5.5	5.5	-258.4	1 075.1	5.2	4.5	-2.1	0.4	6.4	6.4	-181.3	169.9
dX4	6.5	6.5	-258.4	1 075.1	6.1	5.7	-2.1	0.4	7.3	7.3	-172.6	170.0
dX1	4.5	4.5	-1 487.0	1 492.4	4.0	3.3	0.0	5.0	6.0	5.9	-985.9	854.9
dX1	5.5	5.5	-1 474.6	1 592.1	5.0	4.0	0.0	79.8	7.7	7.7	-1 044.4	989.5
dX1	6.5	6.5	-1 487.0	1 492.4	5.7	4.8	0.0	5.0	8.5	8.5	-968.8	842.5
dX2	4.5	4.5	-723.5	723.5	3.6	2.3	-12.4	0.0	6.1	6.1	-1 550.0	376.8
dX2	5.5	5.5	-723.5	723.5	4.4	2.8	-12.4	0.0	7.5	7.5	-1 412.5	385.2
dX2	6.5	6.5	-725.5	725.5	5.3	3.1	-6.2	0.0	8.8	8.8	-1 681.2	373.2
dX3	4.5	4.5	-437.3	285.3	3.3	0.3	-28.5	2.0	5.9	5.9	-261.9	200.3
dX3	5.5	5.5	-437.3	285.3	4.1	0.4	-28.5	2.0	7.3	7.2	-263.7	202.1
dX3	6.5	6.5	-437.3	285.3	4.7	0.5	-28.5	2.0	8.4	8.4	-258.4	200.3
dX5	4.5	4.5	-1 191.4	1 204.2	3.5	2.2	-37.1	0.0	6.9	6.8	-759.6	606.8
dX5	5.5	5.5	-1 191.4	1 204.2	4.3	2.8	-37.1	0.0	8.5	8.5	-766.4	630.0
dX5	6.5	6.5	-1 191.4	1 204.2	5.0	3.2	-37.1	0.0	9.8	9.8	-749.7	606.8

遍发生在山顶位置, 在背风面半山腰和山脚处风速明显降低; 入流风速的等值点通常发生在沿山坡方向山腰的位置; 当坡高达到 300 m 以上时, 孤峰下游低风速区较明显; 当坡度增大到

20°时, 下风向速度亏损较为明显, 当坡度达到 30°时, 出现回流现象, 下风向风速最小值接近 0 m/s, 所以坡度对回流区的影响远大于坡高的影响。

### 3.2 台地地形流场分析

图 13,14 分别为 dx7 和 dx8 地形在离地 120 m 高度处的风资源分布。

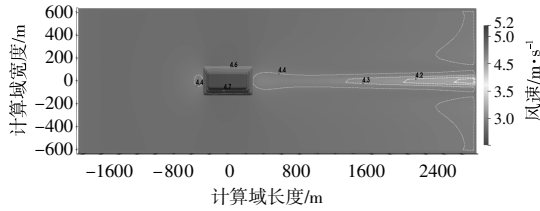


图 13 dx7 地形流场分布

Fig.13 Distribution of the flow field in the dx7 terrain

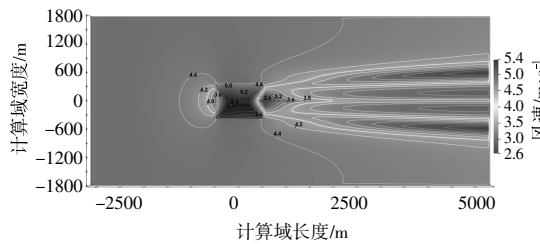


图 14 dx8 地形流场分布

Fig.14 Distribution of the flow field in the dx8 terrain

由图 13,14 可知:当气流流经山体时,受到地

形挤压会产生明显的加速效应;由于山地阻碍作用,当气流流过山体后,会产生长段速度亏损的尾流区。

台地地形不同坡度和坡高下风速对比见图 15。

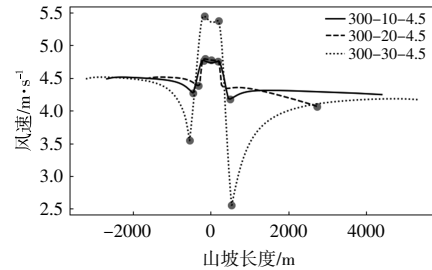


图 15 不同坡度和高度台地地形下风速对比

Fig.15 Wind speed comparisons at plateau topography of different slopes and heights

由图 15 可知,坡高对台地流场的影响更明显,当山体高度增加时,由于阻塞效应的增强,迎风区山脚处风速亏损范围变大且风速下降更为明显。

表 3 为台地地形上风向和下风向风速最大、最小和风速等值点。

表 3 台地地形上、下风向风速最大、最小和风速等值点

Table 3 The table of maximum,minimum,and isopleth points of wind speed of plateau topography in upwind and downwind direction

类型	入流风速/ $m \cdot s^{-1}$		$x_{min}$		$u_{min}$		$x_{max}$		$u_{max}$		风速等值点	
	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向
dx6	4.5	4.5	-450.9	503.9	4.3	4.2	-178.0	183.0	4.8	4.8	-282.8	281.0
	5.5	5.5	-450.9	503.9	5.3	5.2	-178.0	183.0	5.9	5.9	-282.8	281.0
	6.5	6.5	-450.9	503.9	6.1	6.0	-178.0	183.0	6.8	6.8	-282.8	281.0
dx8	4.5	4.5	-538.9	538.9	3.5	2.6	-160.0	199.4	5.4	5.4	-340.8	340.8
	5.5	5.5	-538.9	538.9	4.4	3.1	-160.0	199.4	6.7	6.6	-340.8	340.8
	6.5	6.5	-538.9	538.9	5.1	3.7	-160.0	199.4	7.8	7.7	-340.8	340.8
dx7	4.5	4.5	-317.0	2 749.9	4.4	4.1	-136.6	6.3	4.8	4.8	-1.3	5.7
	5.5	5.5	-335.0	2 749.9	5.4	5.5	-140.3	6.3	6.0	6.0	-1.3	5.7
	6.5	6.5	-317.0	2 749.9	6.3	5.8	-136.6	6.3	6.9	6.8	-1.3	81.4

由表 3 可知:由于山地风加速效应的存在,且平台顶部较为光滑,离地 120 m 高度时风速最大值普遍发生在平台前后端;入流风速的等值点通常发生在沿流向方向山腰的位置。

### 3.3 峰丛地形流场分析

图 16~19 分别为不同坡度条件下,峰丛地形的流场分布和风速对比图。

由图 16,17 可知:沿来流方向,由于尾流作用和阻塞效应的叠加,坡前、坡后的风速亏损趋于一致;受到第一排峰丛阻塞效应的影响,峰丛前方出现显著速度亏损,其次由于“集群效应”,峰丛影响

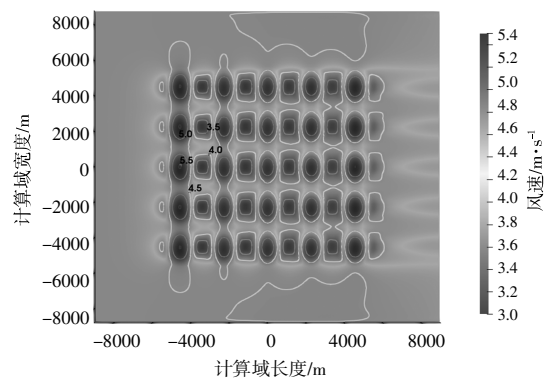


图 16 dx9 地形流场分布

Fig.16 Distribution of the flow field in the dx9 terrain

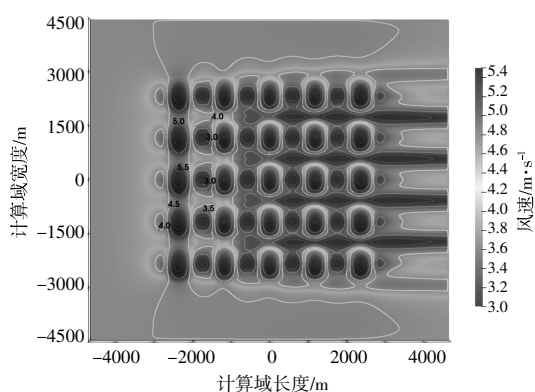


图 17 dx10 地形流场分布

Fig.17 Distribution of the flow field in the dx10 terrain

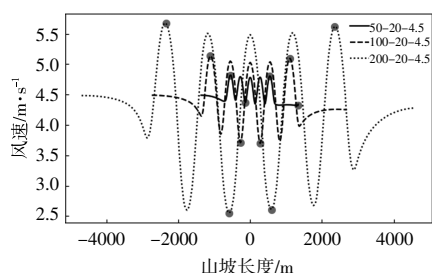


图 18 不同高度峰丛地形下风速对比

Fig.18 Wind speed comparisons at peak cluster topography of different heights

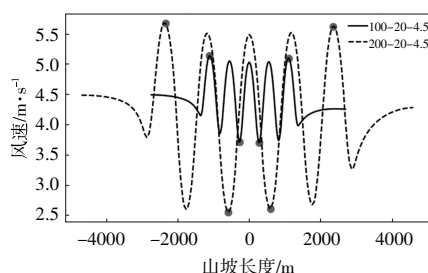


图 19 不同坡度峰丛地形下风速对比

Fig.19 Wind speed comparisons at peak cluster topography of different slopes

范围相对于孤峰地形有所扩大,其上游影响范围可达  $5H$ ,侧向加速区位置出现在后方山坡,其影响范围也可达  $5H$ 。在峰丛阻塞效应的影响下,下游布置的风机发电量会有所降低,两侧风机的发电量会受加速区影响而增加,应尽量避免在阻塞效应引起的上游感应区布置风机。

由图 18,19 可知,峰丛地形中风速最大值多位于距原点中心山峰  $4L$  处的第一个山峰峰顶处,风速最小值多位于两侧的山谷区域。

表 4 为峰丛地形上风向和下风向风速最大、最小和风速等值点。

表 4 峰丛地形上、下风向风速最大、最小和风速等值点

Table 4 The table of maximum, minimum, and isopleth points of wind speed of peak cluster topography at upwind and downwind direction

类型	入流风速/ $m \cdot s^{-1}$		$x_{min}$		$u_{min}$		$x_{max}$		$u_{max}$		风速等值点	
	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向	上风向	下风向
dx9	4.5	4.5	-1 140.0	1 125.0	3.1	3.1	-4 560.0	4 560.0	5.5	5.5	-460.5	495.5
	5.5	5.5	-1 140.0	1 125.0	3.8	3.8	-4 560.0	4 560.0	6.8	6.8	-750.3	750.3
	6.5	6.5	-1 140.0	1 125.0	4.4	4.5	-4 560.0	4 560.0	7.9	7.9	-1 031.8	1 031.8
dx10	4.5	4.5	-587.5	587.5	2.5	2.6	-2 350.1	2 350.1	5.7	5.6	-248.5	261.1
	5.5	5.5	-587.5	587.5	3.1	3.2	-2 350.1	2 350.1	7.0	6.9	-347.0	359.7
	6.5	6.5	-587.5	587.5	3.7	3.7	-2 350.1	2 350.1	8.1	8.1	-412.5	412.5
dx11	4.5	4.5	-273.5	273.5	3.6	3.6	-1 113.5	1 113.5	5.1	5.1	-133.6	133.6
	5.5	5.5	-273.5	273.5	4.5	4.5	-1 113.5	1 113.5	6.3	6.3	-268.5	259.0
	6.5	6.5	-273.5	273.5	5.4	5.4	-1 113.5	1 113.5	7.6	7.5	-273.5	273.5
dx12	4.5	4.5	-138.9	1 330.3	4.4	4.3	-546.1	546.1	4.8	4.8	-93.5	88.5
	5.5	5.5	-138.9	1 330.3	5.3	5.3	-546.1	546.1	5.9	5.9	-134.1	137.0
	6.5	6.5	-138.9	1 330.3	6.3	6.2	-546.1	546.1	7.0	6.9	-134.1	137.0

由表 4 可知:上、下风向速度最大值不随位置的变化而改变,风速分布呈现出对称分布趋势,风速最小值变化情况和风速最大值变化情况一致,这表明风速最大、最小值发生点位与山峰形状关系较小;峰丛地形风速最大、最小值受高度影响更

大,坡高每变化 50 m,风速最大、最小值分别变化约 0.4 m/s 和 1 m/s;当坡高一一致,坡度发生变化时,坡度每变化  $10^\circ$ ,风速最大、最小值分别变化约 0.2 m/s 和 0.6 m/s,由此可知,对于峰丛地形,坡高变化对风速影响更大。

### 3.4 地形效应对微观选址的影响

风力机的输出功率与风速的 3 次方成正比,因此,在风电场微观选址时,风速是须要权衡的重要因素之一。一般情况下,山地对风速的影响可用中性条件下的  $\Delta S$  表征,本文主要考虑离地 120 m 处的  $\Delta S$  分布情况。表 5,6 分别为来流风速为 4.5 m/s 工况下,孤峰和峰丛地形中  $\Delta S$  超过 0.1 的范围。

表 5 孤峰地形风速分布范围

Table 5 The table of wind speed distribution range on solitary peak topography

地形 编号	入流风速 m/s	风速区间 (平行于风向)	风速区间 (垂直于风向)
dX1	4.5	(-725~668)	(-689~644)
dX2	4.5	(-351~326)	(-787~787)
dX3	4.5	(-213~181)	(-403~415)
dX4	4.5	(-146~147)	(-169~169)
dX5	4.5	(-640~523)	(-1 254~1 256)

表 6 峰丛地形风速分布范围

Table 6 Wind speed distribution range table for mountain ridge

地形 编号	入流 风速 m/s	①号孤峰 风速区间 (平行)	①号孤峰 风速区间 (垂直)	②号孤峰 风速区间 (平行)	②号孤峰 风速区间 (垂直)	③号孤峰 风速区间 (平行)	③号孤峰 风速区间 (垂直)	④号孤峰 风速区间 (平行)	④号孤峰 风速区间 (垂直)
dX9	4.5	(-372~376)	(-676~706)	(-236~326)	(-462~492)	(-300~417)	(-522~552)	(-251~311)	(-477~477)
dX10	4.5	(-221~211)	(-409~433)	(-136~207)	(-288~312)	(-162~249)	(-296~320)	(-162~195)	(-308~308)
dX11	4.5	(-72~69)	(0~0)	(-19~39)	(0~0)	(-44~74)	(-185~215)	(0~0)	(-175~209)
dX12	4.5	(0~0)	(0~0)	(0~0)	(0~0)	(0~0)	(0~0)	(0~0)	(0~0)

## 4 结论

本文基于开源软件 OpenFOAM,对 3 类典型复杂地形进行流场模拟计算,深入研究复杂地形流场分布规律,得到以下结论。

①同一地形下,改变入流风速,流速变化趋势一致,满足雷诺数无关性准则,即相同位置处  $\Delta S$  不变。

②对于不同坡度和高度的孤峰地形,上风向和下风向的风速最大和最小值普遍位于接近坡顶和坡脚位置,入流风速的等值点多位于孤峰的半山腰处;当高度恒定、坡度渐高时,气流流过孤峰后形成回流区,导致风速亏损严重,下风向最小和最大风速明显降低;坡度对下游风速的影响要远大于坡高对下游风速的影响,当坡度达到  $30^\circ$  时,风速亏损较大,并出现回流现象,下风向风速最小值接近 0 m/s。

③台地迎风面山脚处的速度分布与孤峰地形相似,逆压梯度的作用使得边界层迅速增大并出现较小的减速区,在平台上有风速加速效应,但台地坡度的增大对回流区的影响较小,坡高变化对流场的影响较大,坡高每变化 50 m,风速最大、最小值分别变化 0.2 m/s 和 0.5 m/s。

④峰丛地形在不同坡高和坡度情况下的流场发展情况一致,坡高每变化 50 m,风速最大、最小值分别变化 0.4 m/s 和 1 m/s,坡高变化引起的速

度亏损要大于坡度变化。

### 参考文献:

- [1] Martinez B. Wind resource in complex terrain with OpenFOAM [J]. Riso DTU, National Laboratory for Sustainable Energy, 2011(6): 101.
- [2] Balogh M, Parente A, Benocci C. RANS simulations of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced  $k-\varepsilon$  model and wall function formulations: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2012(104): 360-368.
- [3] Weller H G, Tabor G, Jasak H, et al. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques [J]. Computers in Physics, 1998, 12(6): 620-631.
- [4] Weng W S, Peter A, Taylor J, et al. Guidelines for air-flow over complex terrain: Model developments [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 86: 169-186.
- [5] 史俊杰, 许昌, 雷娇, 等. 典型山丘地形与风力机诱导涡流耦合演变规律 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 85-94.
- [6] Alinot C, Masson C.  $k-\varepsilon$  model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(4): 438-443.
- [7] Koblitz T, Sørensen N N, Bechmann A, et al. CFD

- modeling of non-neutral atmospheric boundary layer conditions [D].Roskilde:Technical University of Denmark, 2013.
- [8] Blocken B, Carmeliet J, Stathopoulos T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings –effect of wall –function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(9): 941–962.
- [9] Parente A, Gorlé C, Van Beeck J, et al. A comprehensive modelling approach for the neutral atmospheric boundary layer: Consistent inflow conditions, wall function and turbulence model [J]. *Boundary –layer Meteorology*, 2011, 140(3): 411–428.
- [10] Fluent Inc. *Fluent 6.3 User’s Guide* [M]. Lebanon: Fluent Inc., 2006.
- [11] Panofsky H, Dutton J. *Atmospheric Turbulence* [M]. New York: Wiley, 1984.
- [12] Richards P J, Hoxey R P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the  $k-\epsilon$  turbulence model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993 (46–47): 145–153.
- [13] Taylor P A, Teunissen H W. *Askervein’82: Report on the September/October 1982 Experiment to Study Boundary Layer Flow Over Askervein*, South Uist [M]. Toronto: Meteorological Services Research Branch, Atmospheric Environment Service, 1983.
- [14] Taylor P A, Teunissen H W. *The Askervein Hill Project: Report on the September/October 1983, Main Field Experiment* [M]. Toronto: Meteorological Services Research Branch, Atmospheric Environment Service, 1985.
- [15] 梁思超. 复杂地形风资源特性的数值模拟研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

## The evolution of complex terrain flow fields based on OpenFOAM

Cao Xiaoyan, Xu Chang, Cheng Zhe, Han Xingxing, Xue Feifei  
(Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** With the depletion of resources in flat terrain, the site selection for wind farms is gradually shifting towards complex terrains. Complex terrain presents geographical conditions distinct from flat terrain, the undulating topography leads to intricate flow patterns, and the wind characteristics in complex terrains are also different. Therefore, studying the distribution patterns of flow fields in complex terrain is significant for micro-siting of wind farms and wind power prediction. This paper, based on the open-source software OpenFOAM, establishes geometric and numerical simulation models for complex terrain. It investigates and analyzes grids, boundary conditions, and turbulence models suitable for complex terrain. The reliability of the numerical model for complex terrain is compared and analyzed using real measurement data from the Askervein mountain. The paper solves the flow field distribution for typical complex terrains such as isolated peaks, plateaus, and peak clusters, studying the impact of slope and height on the flow fields in different terrains. The research reveals that different terrains satisfy the Reynolds number independence principle. In isolated peak topography, the influence of slope becomes more pronounced in the lee zone behind the mountain as the slope increases. Plateau terrain is more affected by changes in height. For peak cluster topography, the flow field development remains consistent under varying slopes and heights, with height having a greater impact compared to slope. The provided distribution ranges of flow field characteristic values in this paper can serve as a reference for wind farm micro-siting and wind power prediction in complex terrain.

**Keywords:** numerical simulation; OpenFOAM; isolated peak; peak cluster; wind farm