

文章编号:1674-2974(2016)01-0037-08

## 单山和双山风场特征的 CFD 数值模拟<sup>\*</sup>

沈国辉<sup>1†</sup>, 姚旦<sup>2</sup>, 楼文娟<sup>1</sup>, 邢月龙<sup>3</sup>, 潘峰<sup>3</sup>, 郭勇<sup>3</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2 杭州市建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000; 3 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310007)

**摘要:**采用 CFD 模拟方法研究单山和双山情况下三维山丘风场, 研究计算模型表面粗糙度对风场的影响, 计算不同坡度山体情况下单山的风场, 进行两个山体左右排列情况的风场计算, 分析坡度、风向角、间距对双山风场的影响. 研究表明: 山体的计算模型表面粗糙度增大时, 山顶上方半山高度的加速效应减弱, 山后尾流区的高度增加; 山体横风切面的加速效应大于顺风切面, 横风切面内半山以上的位置均为风速最大值区域; 左右双山紧贴排列情况下, 风斜吹时前山山顶的加速比大于后山山顶, 风直吹的数据在两者中间.

**关键词:**CFD 模拟; 平均风速; 风场计算; 三维山体; 峡谷风效应

**中图分类号:**TU312.1

**文献标识码:**A

## Investigation of the Wind Field Characteristics on Isolated Hill and Two Adjacent Hills Using CFD Numerical Simulation

SHEN Guo-hui<sup>1†</sup>, YAO Dan<sup>2</sup>, LOU Wen-juan<sup>1</sup>, XING Yue-long<sup>3</sup>, PAN Feng<sup>3</sup>, GUO Yong<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Univ, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Hangzhou Architectural Design & Research Institute Co Ltd, Hangzhou, Zhejiang 310000, China;

3. Electric Power Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310007, China)

**Abstract:** CFD numerical simulation method was employed to study the wind field characteristics of three-dimensional hills under isolated hill and two adjacent hills condition. The influence of the calculation model surface roughness on the wind field was studied. The wind fields on isolated hill with different slopes were calculated. The wind fields of two adjacent hills in left-right arrangement were also investigated, and the influence of the hill slope, wind azimuth and hill distance on the wind field was studied. The results show that, if the model surface roughness increases, the speedup effect of half hill height above the top of the hill decreases and the height of vortex region increases. The speedup effects on the cross-wind plane of an isolated hill are more significant than those on the along-wind plane, and the most unfavorable position ranges from the half hill height to the top of the hill on the cross-wind plane. When two adjacent hills are in left-right arrangement with zero distance, the speedup ratios on the front hill are larger than those on the rear hill under yawed azimuth, and the speedup ratio, when wind blows perpendicularly to the two hills, is between these two data.

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178425), National Natural Science Foundation of China(51178425)

作者简介:沈国辉(1977-),男,浙江台州人,浙江大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: ghshen@zju.edu.cn

**Key words:** CFD simulation; mean wind velocity; wind field calculation; three dimensional hill; wind tunneling effect

风流经山地时,受到地形的影响,会形成复杂的山地风场,该风场与平地风场有较大差异. 各国规范<sup>[1-4]</sup>均给出了山地风场的修正方法,中国 GB 规范<sup>[1]</sup>对风压高度变化系数进行了修正,其他规范<sup>[2-4]</sup>对风速进行了修正. 但多数规范<sup>[1-3]</sup>的修正方法通常针对二维山体情况,没有给出三维山体情况下的数据,同时各国规范<sup>[1-4]</sup>对于两个山体形成的风场没有进行规定.

山体风场特征的研究方法主要有现场实测<sup>[5]</sup>、风洞试验<sup>[6-8]</sup>和 CFD 数值模拟<sup>[6-12]</sup>. CFD 数值模拟可以按实际尺寸进行计算,可避免风洞试验只能进行缩尺试验的不足,并具有成本低、速度快、资料完备等优点,本文采用该方法进行研究. 以往研究中, Kim 等<sup>[6]</sup>对两个二维山体前后排列的情况进行模拟,分析后山的尾流区尺寸; Breuer 等<sup>[7]</sup>通过数值模拟和风洞试验研究了二维周期性山体的风场. 李朝<sup>[8]</sup>进行不同山体风场的计算,并与风洞试验结果进行比较; 陈平<sup>[9]</sup>对典型山体的风场进行模拟,并分析不同山体组合山地情况; 祝志文等<sup>[10]</sup>对峡谷地貌大跨度桥梁选址处进行数值模拟,获得桥址处各位置的风场数据; 肖仪清等<sup>[11]</sup>针对某复杂地形进行模拟,并与实测风速进行了比较; 魏奇科等<sup>[12]</sup>、李鑫<sup>[13]</sup>、李正良等<sup>[14]</sup>对一系列山体的风速进行 CFD 和风洞试验研究,并进行比较.

本文针对单山和双山情况下三维山丘的风场,研究 CFD 模拟中表面粗糙度对山体风场的影响,进行单个山体模型的模拟计算并分析山体坡度的影响,进行两个山体左右排列情况的计算,分析山体坡度、风向角、山体间距对双山风场的影响,研究成果可为复杂山地的风场特性提供参考. 需要说明的是,本文只给出山体上顺风向的平均风速,不涉及脉动风速,也不涉及其他风向的风速.

## 1 CFD 的建模过程和湍流模型

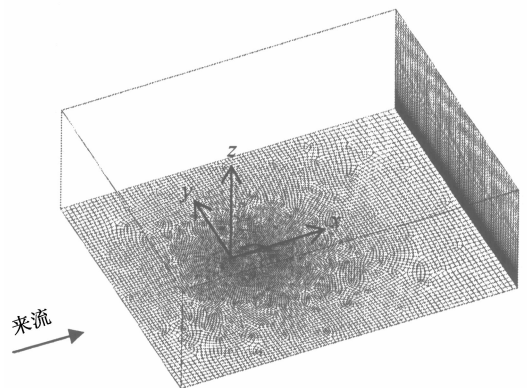
山体高度  $H$  均取 100 m, 形状为余弦型, 方程为:

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

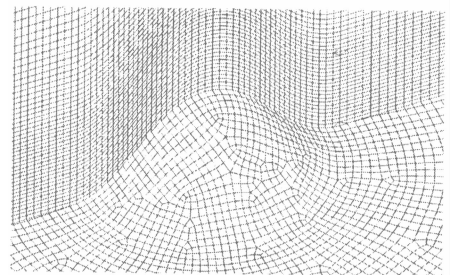
式中:  $z$  为高度方向;  $x, y$  为水平方向;  $D$  为山体底部直径. 对 7 组坡度山体进行 CFD 建模计算, 山体底部直径分别为 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 600

m, 700 m 和 800 m.

计算的流场高度统一取为  $8H$ , 流场的宽度依据山体直径而变化, 以典型陡坡山体 ( $D=300$  m) 为例, 流场宽取为  $6D$ , 上游长度取为  $3D$ , 下游长度取为  $4.5D$ . 流场内全部采用结构化六面体单元网格进行划分, 网格尺寸在山体表面最密, 然后向外扩散. 所有工况的阻塞率全部小于 3%, 网格数各异, 数量在 70 万到 340 万之间, 典型陡坡网格划分情况如图 1 所示, 图中还给出了来流方向和  $x, y, z$  坐标定义.



(a) 网格总体示意图



(b) 网格局部放大图

图 1 典型陡坡山体的网格划分

Fig. 1 Grid meshing of typical steep hill

湍流模型选用被广泛应用于模拟大气边界层的 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[9-15]</sup>. 计算中地貌取 B 类 ( $\alpha=0.15$ ), 平均风速  $u$  和湍流度  $I_u$  依据荷载规范<sup>[1]</sup>:

$$u = u_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^{0.15} \quad (2)$$

$$I_u = 0.14 \left(\frac{z}{10}\right)^{-0.15} \quad (3)$$

式中:  $u_{10}$  为基本风速, 计算中取 30 m/s. 入口处湍流动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$  通过 UDF 接口编程输入, 表达式如下:

$$k = \frac{3}{2} (u I_u)^2 \quad (4)$$

$$\epsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (5)$$

式中:  $C_{\mu} = 0.09$ ,  $l$  为湍流积分尺度, 参考日本 AIJ2004 规范<sup>[3]</sup>的取值:

$$l = \begin{cases} 100 \left( \frac{z}{30} \right)^{0.5} & 30 \text{ m} < z < z_g; \\ 100 & z < 30 \text{ m}. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $z_g$  为梯度风高度. 入流面设定为速度入口, 出流面设定为压力出口, 流场两侧和顶部设定为对称面, 山体表面和周围的平地设定为壁面, 选用非平衡壁面函数模拟近壁面的流动, 数值离散格式均采用二阶迎风格式.

## 2 计算模型的山体表面粗糙度选择

山体表面粗糙度的设定对山体风场的计算有一定的影响, 对各种模型表面粗糙度进行试算. 以典型陡坡山体 ( $D=300 \text{ m}$ ,  $H=100 \text{ m}$ ) 为例, 山体表面粗糙高度取 7 种, 分别为  $0 \text{ m}$ ,  $0.05 \text{ m}$ ,  $0.1 \text{ m}$ ,  $0.2 \text{ m}$ ,  $0.5 \text{ m}$ ,  $1 \text{ m}$  和  $2 \text{ m}$ , 地面粗糙度取  $0 \text{ m}$ . 图 2 给出了  $0 \text{ m}$ ,  $0.1 \text{ m}$  和  $1 \text{ m}$  粗糙高度情况下的流线图, 由图可知: 1) 随着粗糙高度增加, 山体后部尾流区的尺寸扩大; 2) 当粗糙高度为  $0 \text{ m}$  时, 尾流区很小; 当粗糙高度为  $0.1 \text{ m}$  时, 尾流区长度方向延伸到后侧山脚之后  $D/4$  的距离, 宽度约  $D/3$ , 高度约  $0.6H$ ; 当地面粗糙高度为  $1 \text{ m}$  时, 尾流区长度方向延伸到后侧山脚之后  $D/2$  的距离, 宽度约  $0.6D$ , 高度约  $0.8H$ .

图 3 给出了 7 种粗糙高度情况下山顶位置的平均风速和加速比, 加速比  $s$  定义为:

$$s(z) = u(z)/u_0(z). \quad (7)$$

式中:  $u$  为距山体表面  $z$  高度处的风速,  $u_0$  表示距地面  $z$  高度处的风速. 由图 3 可知: 1) 7 种粗糙高度下, 在山顶位置均出现了较大的加速效应; 2) 离山顶约  $100 \text{ m}$  高度以上, 风速差别很小; 3) 离山顶约  $100 \text{ m}$  高度以下, 风速开始出现差异, 在约  $50 \text{ m}$  高度处差异较为明显, 且随着粗糙高度增加, 加速效应减弱; 4) 对于典型陡坡山体, 粗糙高度在  $0 \text{ m}$  至  $2 \text{ m}$  这一范围内变化时, 只影响离地约  $100 \text{ m}$  以内的风速.

图 4 给出了 7 种粗糙高度情况下后山脚位置 ( $x = D/2, y = 0$ ) 的平均风速和加速比, 可以发现: 1) 在离地  $120 \text{ m}$  以上, 不同粗糙高度下的风速都很接近平地情况, 即加速比接近 1; 2) 在离地  $120 \text{ m}$  以下, 存在显著的减速效应, 为尾流区; 3) 尾流区的高度基本上随着粗糙高度的增大而升高.

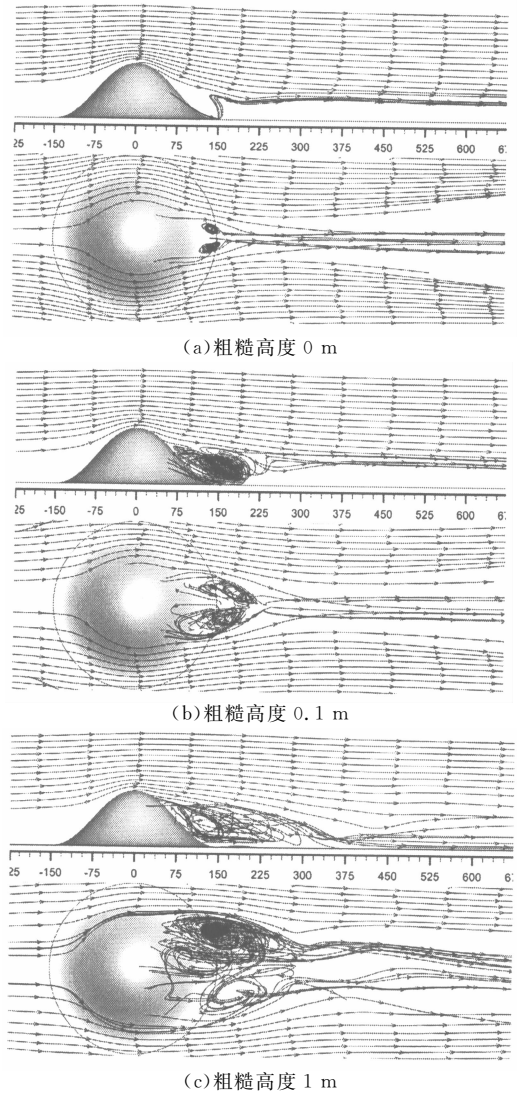


图 2 3 种粗糙高度的流线图

Fig. 2 Flow line of three types of roughness heights

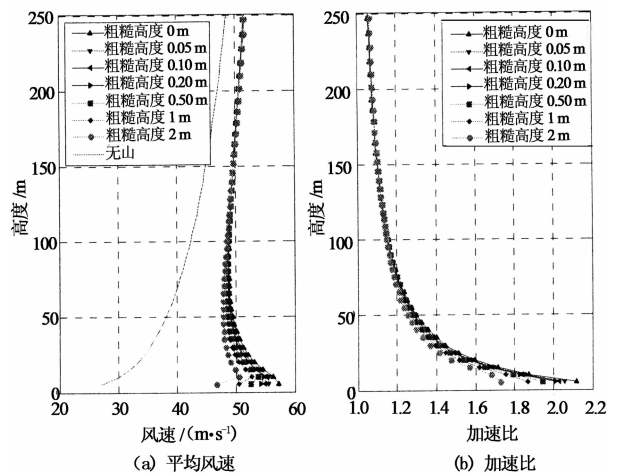


图 3 山顶位置的风速和加速比

Fig. 3 Wind velocity and speedup ratio at top of hill

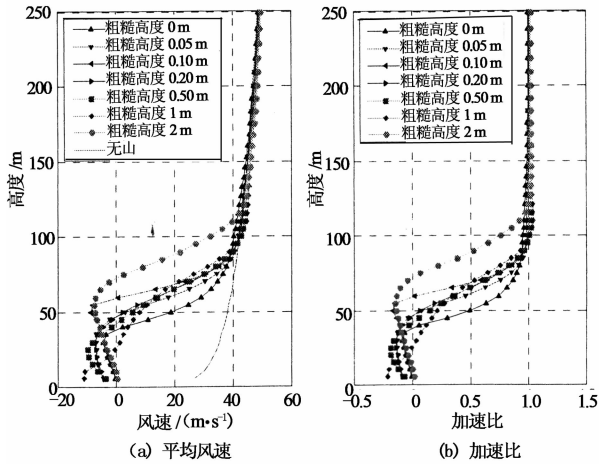


图4 后山脚位置的风速和加速比  
Fig. 4 Wind velocity and speedup ratio at back bottom of hill

由图3和图4可知,山体表面粗糙度对风场结果有一些影响,根据 Fluent 软件的帮助文件,地面粗糙高度的取值应与粗糙表面沙粒直径大致相等,考虑到山体上通常覆盖了低矮灌木和计算工况的针对性,在后面的计算中,将山体的粗糙高度设为 1 m,地面的粗糙高度设为 0 m.

### 3 单个山体的风场

#### 3.1 典型陡坡山体的计算结果

计算典型陡坡山体( $D=300\text{ m}$ )的风场,图5给出了过山体中心顺风切面( $y=0$ )内的平均风速和加速比,由图可知:1)在高度方向,距离山体越远加

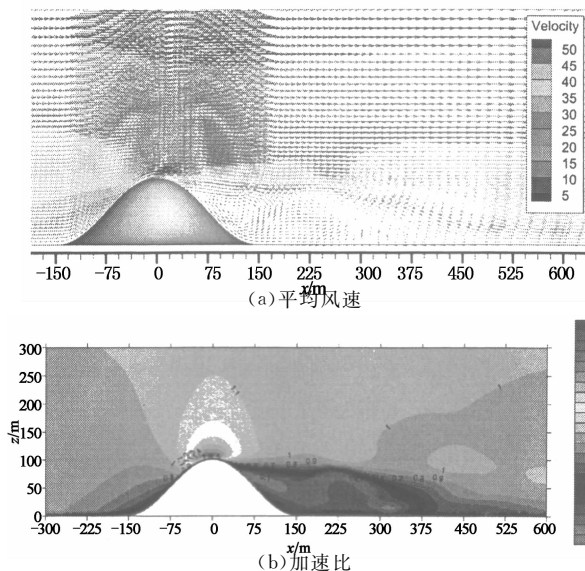


图5 顺风剖面的风速和加速比  
Fig. 5 Wind velocity and speedup ratio on along-wind plane

速比越趋近于 1;2)在山体前部较低高度处有一较小的减速区;3)山体后部存在较大的尾流区.

图6给出了过山体中心横风切面( $x=0$ )内的加速比,由图可知:1)横风切面上半山以上的位置均出现了风速增大现象,该现象即为“孤峰绕流效应”;2)加速比在贴近山体位置最大,沿着高度方向递减,距离山体越远加速比越趋近于 1;3)对比图6(b)的数据可知,横风切面方向的加速效应大于顺风切面方向.

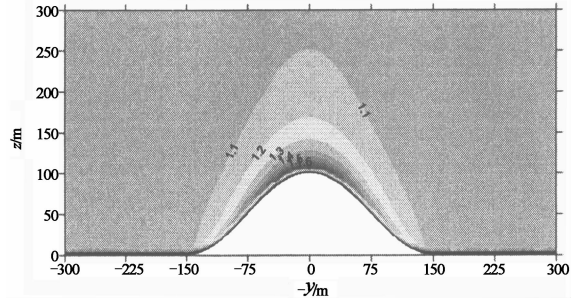


图6 横风剖面的加速比  
Fig. 6 Speedup ratio on cross-wind plane

图7给出了离地面(山体)表面距离为 5 m 和 40 m 的风速加速比,可以发现:1)最大加速比出现在山顶位置;2)在离地面(山体)表面距离为 5 m 处,山侧往迎风方向大约  $15^\circ$  的位置存在一条加速比极大值线;3)山后尾流区的加速比很小;4)前山脚附近有较小的减速区;5)随着离地面(山体)表面距离增加,加速比趋近于 1,但是尾流区范围内的加速比仍然很小.

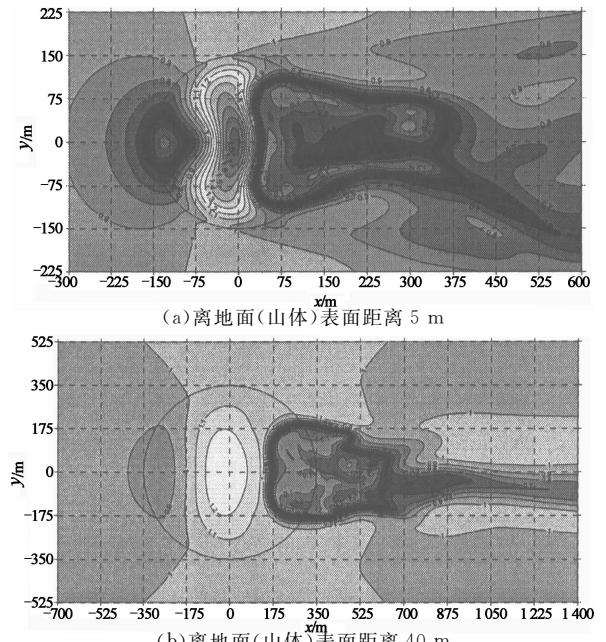


图7 两个高度上的加速比  
Fig. 7 Speedup ratio of two heights

图 8 给出了底部直径 300 m 山体在山顶位置的加速比,图中还给出了该山体在 1 : 500 缩尺比情况下的风洞试验<sup>[15]</sup>结果.由图 8 可知,数值模拟和风洞试验结果在 60 m 高度以上非常吻合,在 60 m 高度以下存在一些差异,导致差异的原因有山体表面粗糙度设置、CFD 的湍流模型设置、风洞试验测速设备在靠近表面时的测试精度等.

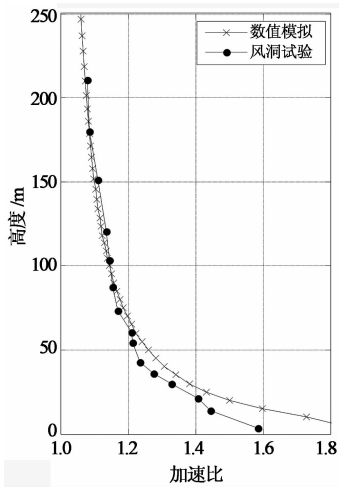


图 8 山顶位置加速比的对比

Fig. 8 Comparison of speedup ratio at top of hill

### 3.2 山体坡度对单山风场的影响

图 9 给出了 7 种山体坡度下山顶位置的平均风速和加速比,山体底部直径分别为 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 600 m, 700 m 和 800 m.由图可知:1)不同坡度山体在山顶位置均出现了较大的加速效应;2)离山顶表面约 30 m 以下,坡度大的山体加速比大;3)离山顶表面约 30 m 至 100 m 是一个过渡区,加速比随坡度的变化规律逐渐改变;4)离山顶表面 100 m 以上,不同坡度山体的平均风速较接近.

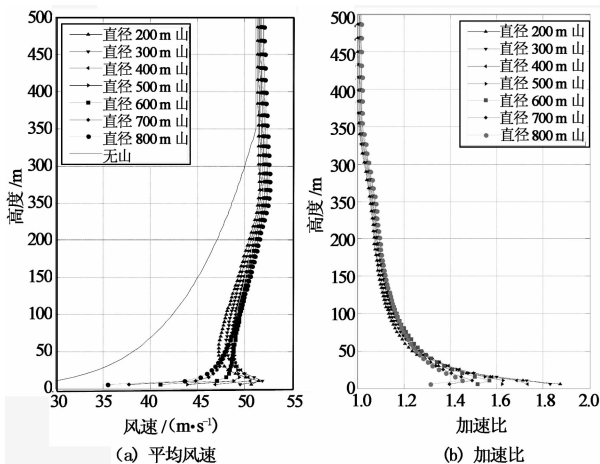


图 9 不同坡度下山顶的风速和加速比  
Fig. 9 Wind velocity and speedup ratio at top of hill under different slopes

图 10 给出不同山体坡度下山顶位置离山体表面不同高度的最大加速比.由图可知:1)在离山顶表面 5 m 高度,随着标准坡度增大,加速比增大且渐趋平缓;2)在离山顶表面 10 m, 20 m, 50 m 高度,随着标准坡度增大,加速比先增后减;3)在离山顶表面 100 m, 200 m 高度,随着标准坡度增大,加速比基本上呈略微下降趋势;4)各离顶高度的加速比曲线在标准坡度 100% 的位置,都已经非常平坦.

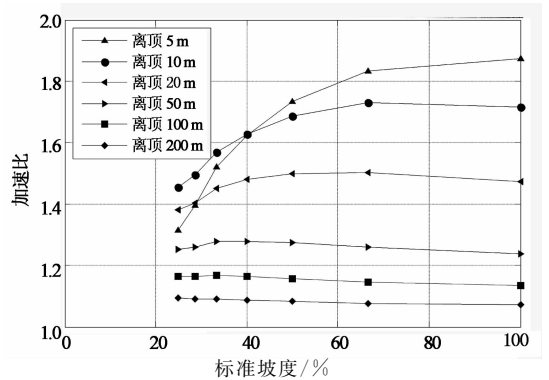


图 10 离山顶不同高度处的加速比  
Fig. 10 Speedup ratio of different heights at top of hill

### 4 陡坡双山左右紧贴排列(间距为零)的风场

#### 4.1 典型陡坡双山的风场

计算典型陡坡山体 ( $D=300\text{ m}$ ) 双山左右紧贴排列(山体间距 0 m)的风场,图 11 给出了离地面(山体)表面距离 5 m 高度处的加速比.由图可知:1)左右排列双山加速比最大的位置依然是山顶附近;2)前山脚附近有较小的减速区,且两减速区之间的区域也存在一定的减速;3)左右双山山后部的尾流区在山后连成一体,形成一个更大的尾流区.

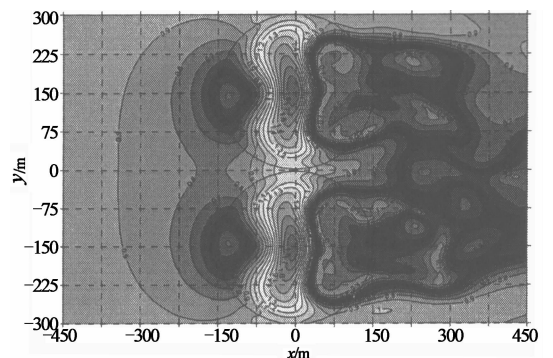


图 11 前后排列双山 5 m 高度的加速比  
Fig. 11 Speedup ratio of 5 m height under left-right arrangement

### 4.2 山体坡度对双山风场的影响

计算两个山体左右紧贴排列情况 7 种山体坡度时的风场, 山体底部直径分别为 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 600 m, 700 m 和 800 m, 图 12 给出 7 种坡度双山山坳中的平均风速和加速比. 由图可知: 1) 7 种坡度山体山坳位置的风速均存在较明显的加速效应; 2) 离地约 200 m 以上, 随着坡度减少加速比呈增大趋势, 但增幅并不大; 3) 离地 100 m 以下, 加速比随坡度的变化比较复杂, 无明显规律.

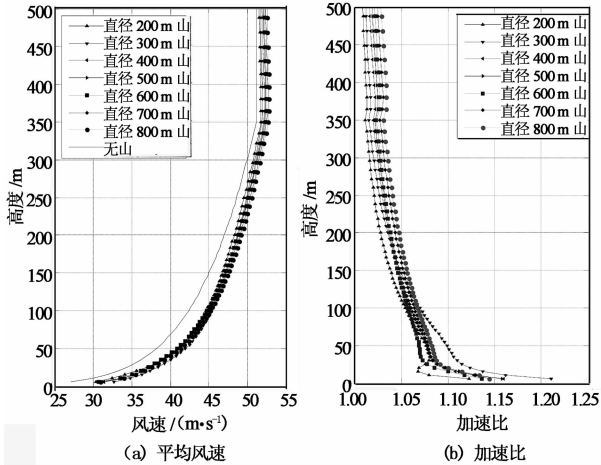
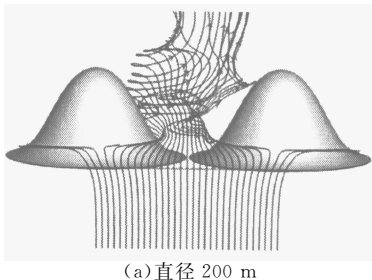
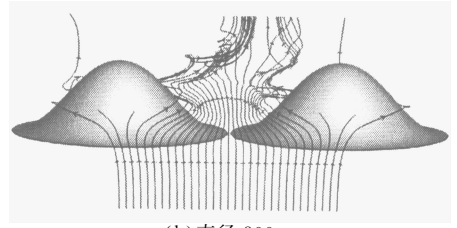


图 12 7 种坡度下山坳中的风速和加速比  
Fig. 12 Wind velocity and speedup ratio at valley under seven slopes

从图 12(b) 还可发现, 离地 100 m 以下, 直径 300 m 的加速比是 7 种坡度山体中的最大值. 直径 300 m 山体比底部直径更大山体的加速比大是很好理解的, 因为两山中间的断面增大了, 风速自然小了. 但怎么理解比底部直径 200 m 的加速比大, 下面从绕流方式角度进行分析. 图 13 给出了底部直径 200 m 和 300 m 山体 10 m 高度的流线, 可以发现对于直径 200 m 的山体, 有 3 条流线从外侧绕流; 对于直径 300 m 山体, 只有 2 条流线从外侧绕流. 说明来流流经底部直径 200 m 山体时经峡谷的阻力增大, 有较多的来流从双山的外侧绕流, 而不经峡谷, 因而峡谷中底部直径 300 m 山体的加速比大于直径 200 m 山体.



(a) 直径 200 m

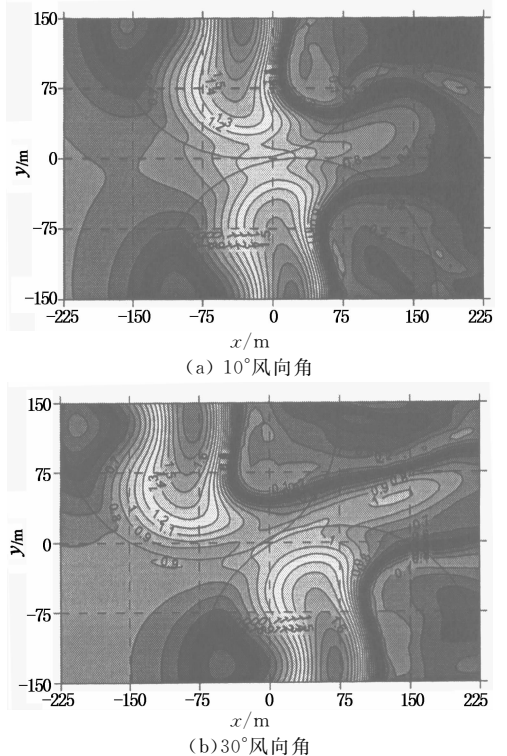


(b) 直径 300 m

图 13 2 种底部直径山体 10 m 高度的流线图  
Fig. 13 Flow line on 10 m height under two bottom diameters of hill

### 4.3 风向角对峡谷风风场的影响

进行 6 个风向角下左右紧贴排列双山风场的计算, 风向角分别为  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$  和  $30^\circ$ , 图 14 给出了  $10^\circ$  和  $30^\circ$  风向角下离地面 (山体) 距离 5 m 高度处的加速比. 由图可知: 1) 山顶上的加速比分布同单山情况类似; 2) 峡谷尾流区的加速比等值线随着风向角增大发生偏转, 与风向大致平行.



(a)  $10^\circ$  风向角

(b)  $30^\circ$  风向角

图 14 2 种风向角下 5 m 高度的加速比  
Fig. 14 Speedup ratio on 5 m height under two azimuths

图 15 给出了山顶位置离山顶表面 5 m, 10 m 和 20 m 高度的加速比, 图中风向角为正值表示前山, 负值表示后山. 由图 15 可知: 1) 对于这 3 个高度处的加速比, 前山 (风向角为正) 的数据大于  $0^\circ$  (左右排列) 情况,  $0^\circ$  (左右排列) 的数据大于后山; 2) 这 3 个高度处的加速比均在  $15^\circ$  风向角时达到最大.

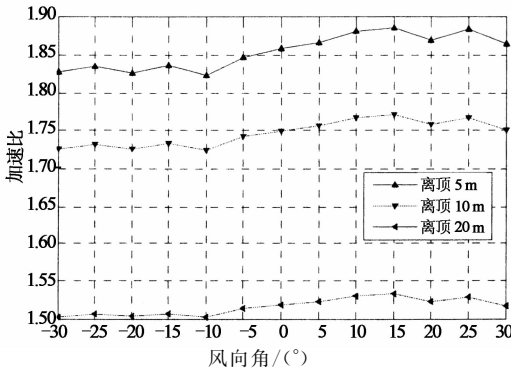


图 15 各风向角下山顶位置的加速比  
Fig. 15 Speedup ratio at top of hill under different azimuths

### 5 山体间距对左右排列双山风场的影响

计算典型陡坡山体 ( $D=300\text{ m}$ ) 左右排列双山在 5 种间距情况的风场计算, 间距分别为  $0\text{ m}$ ,  $50\text{ m}$ ,  $100\text{ m}$ ,  $200\text{ m}$  和  $300\text{ m}$ . 图 16 给出  $0\text{ m}$ ,  $50\text{ m}$  和  $200\text{ m}$  间距下过双山轴线横风切面内的风速加速比, 由图可知: 1) 在不同间距下山体上的加速比数据较接近; 2) 两山正中间 ( $y=0$ ) 处的风速随着山脚间距增大而减小.

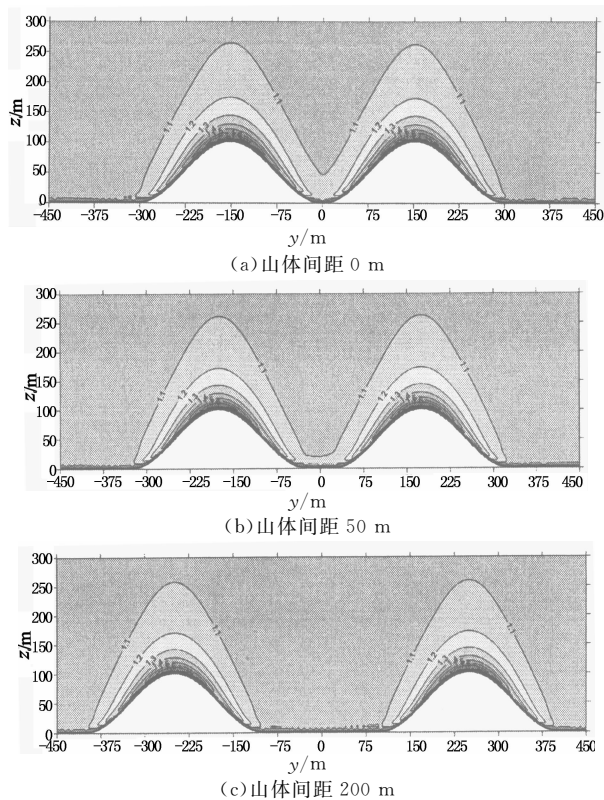


图 16 3 种山体间距下横风剖面的加速比  
Fig. 16 Speedup ratio on cross-wind plane under three hill distances

图 17 给出了不同山体间距下内侧山脚位置 (例: 山脚间距为  $200\text{ m}$  时, 内侧山脚即  $x=0\text{ m}$ ,  $y=\pm 100\text{ m}$  的位置) 的风速加速比. 由图可知: 1) 5 种山体间距下, 内侧山脚位置的风速均存在明显的加速效应; 2) 山脚间距为  $0\text{ m}$  时, 加速效应最强, 随着山脚间距的增大, 加速效应减弱; 3) 山脚间距为  $200\text{ m}$  和  $300\text{ m}$  时内侧山脚的加速效应很接近.

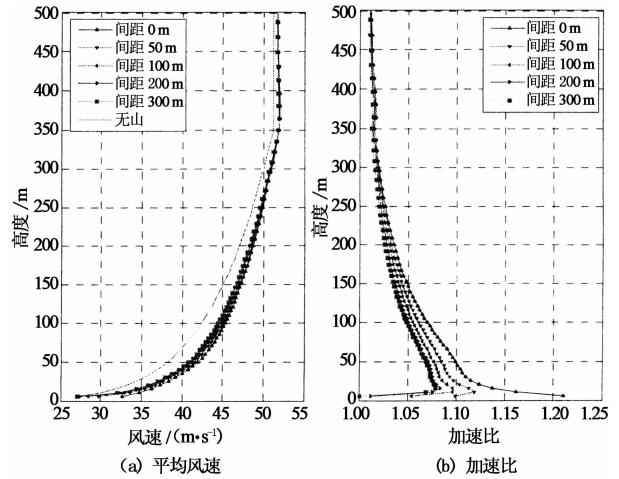


图 17 不同间距下内侧山脚的风速和加速比  
Fig. 17 Speedup ratio at inner side of hill bottom under different hill distances

### 6 结论

本文采用 CFD 数值方法研究单山和双山情况下的三维风场特性, 得到以下结论:

1) CFD 数值模拟中, 表面粗糙度的设定对计算结果的计算有一定的影响, 当山体表面的粗糙度增大时, 山顶上方一半山体高度范围内的风速加速效应减弱, 山后尾流区的高度增加.

2) 单个山体风场的计算结果表明, 山体横风切面的加速效应大于顺风切面, 横风切面内半山以上的位置均出现较大的风速增大现象, 该现象即为“孤峰绕流效应”; 加速比在贴近山体位置最大, 沿着高度方向递减, 距离山体越远加速比越趋近于 1; 山后尾流区的加速比很小, 前山脚附近有较小的减速区; 离山顶表面约  $30\text{ m}$  以下, 坡度大的山体加速比大.

3) 双山左右紧贴排列的计算结果表明, 加速比最大的位置在山顶附近; 山坳中离地  $200\text{ m}$  以上, 随着坡度减少加速比呈增大趋势, 但增幅并不大, 离地  $100\text{ m}$  以下, 直径  $300\text{ m}$  的加速比是 7 种坡度山体中的最大值; 峡谷尾流区的加速比等值线随着风向角增大发生偏转, 与风向大致平行; 在有风向角情



况下,前山山顶的加速比大于后山山顶, $0^\circ$ 风向角的数据在两者中间。

4)不同山体间距下,山体上的加速比数据较接近,但在山体中间存在差异;两山正中间处的风速随着山脚间距增大而减小;山脚间距为 0 m 时,内侧山脚位置的风速加速效应最强,随着山脚间距的增大,加速效应减弱,当距离为 200 m 和 300 m 时内侧山脚的加速效应很接近。

## 参考文献

- [1] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国工业出版社,2012:32—33.  
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012:32—33. (In Chinese)
- [2] AS/NZS 1170. 0 Australian/New Zealand standard[S]. Sydney: AS/NZS, 2002:23—25.
- [3] AIJ 2004 Recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004:611—613.
- [4] ANSI/ASCE 7—10 Minimum design loads for buildings and other structures[S]. New York: ASCE, 2010:315—316.
- [5] WALMSLEY J L, TAYLOR P A. Boundary-layer flow over topography: impacts of the askervein study[J]. *Boundary-layer Meteorological*, 1996, 78:291—320.
- [6] KIM H G, LEE C M, LIM H C, *et al.* An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 66(1): 17—33.
- [7] BREUER M, PELLER N, RAPP C, *et al.* Flow over periodic hills-numerical and experimental study in a wide range of reynolds numbers[J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(2): 433—457.
- [8] 李朝. 近地湍流风场的 CFD 模拟研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2010:42—53.  
LI Chao. Study on CFD simulation of turbulence wind field near ground[D]. Shenzhen: Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 2010:42—53. (In Chinese)
- [9] 陈平. 地形对山地丘陵地区风场影响的数值研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2007:23—35.  
CHEN Ping. Numerical study of terrain influence on the air-flow over hilly land[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2007:23—35. (In Chinese)
- [10] 祝志文, 张士宁, 刘震卿, 等. 桥址峡谷地貌风场特性的 CFD 模拟[J]. 湖南大学学报:自然科学报, 2011, 38(10):13—17.  
ZHU Zhi-wen, ZHANG Shi-ning, LIU Zhen-qing, *et al.* CFD simulation of wind field at bridge site on gorge terrain[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2011, 38(10): 13—17. (In Chinese)
- [11] 肖仪清, 李朝, 欧进萍, 等. 复杂地形风能评估的 CFD 方法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2009, 37(9): 30—35.  
XIAO Yi-qing, LI Chao, OU Jin-ping, *et al.* CFD approach to evaluation of wind energy in complex terrain[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2009, 37(9): 30—35. (In Chinese)
- [12] 魏奇科, 李正良, 孙毅. 山地风加速效应的计算模型[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2010, 38(11): 54—58.  
WEI Qi-ke, LI Zheng-liang, SUN Yi. Calculation model of speedup effect of wind velocity in hilly terrain[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2010, 38(11): 54—58. (In Chinese)
- [13] 李鑫. 山地地形的近地风场特性研究[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院, 2010:21—40.  
LI Xin. Study on characteristics of wind field in ground layer on hilly terrain[D]. Chongqing: College of Civil Engineering, Chongqing University, 2010:21—40. (In Chinese)
- [14] 李正良, 魏奇科, 孙毅. 复杂山地风场幅值特性试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3):184—191.  
LI Zheng-liang, WEI Qi-ke, SUN Yi. Experimental research on amplitude characteristics of complex hilly terrain wind field [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(3): 184—191. (In Chinese)
- [15] 姚旦. 山丘地形风场特性及对输电塔的风荷载作用研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2014:9—39.  
YAO Dan. Research on characteristics of wind field on hilly terrain and its wind load effect on lattice transmission towers [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2014:9—39. (In Chinese)