

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.024

# 峡谷和垭口地形风场特征的 CFD 数值模拟

姚剑锋<sup>1</sup>, 沈国辉<sup>1</sup>, 姚旦<sup>2</sup>, 邢月龙<sup>3</sup>, 楼文娟<sup>1</sup>

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

**摘要:**为获得峡谷和垭口地形的风场特征和典型位置的风加速效应,采用计算流体力学(CFD)方法进行模拟计算,将计算得到的单山结果与风洞试验及规范进行对比以验证 CFD 计算的有效性,对峡谷和垭口地形进行数值模拟计算,分析峡谷和垭口在不同山脚间距时的加速效应,针对内侧山脚和山顶处的加速比给出设计建议.研究表明:山顶处加速比最大;山体横风切面的加速效应比顺风切面显著;CFD 模拟与风洞试验结果吻合较好;山顶处,垭口地形风加速效应比峡谷和单山都大;内侧山脚加速比随着两山靠近而增大;内侧山脚处,峡谷地形的加速比小于规范下限,垭口地形在山间距小于一半山体底部直径、离山表面高度低于 0.4 倍山体高度时的加速比大于规范上限;山顶处的加速比在各种工况下均比较接近;不建议将山顶和垭口位置作为构筑物的选址地点.

**关键词:** CFD 模拟;山地地形;加速效应;风场计算;三维山体

**中图分类号:** TU312.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2016)12-0165-07

## CFD-Based numerical simulation of wind field characteristics on valley and col terrain

YAO Jianfeng<sup>1</sup>, SHEN Guohui<sup>1</sup>, YAO Dan<sup>2</sup>, XING Yuelong<sup>3</sup>, LOU Wenjuan<sup>1</sup>

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;2.Hangzhou Architectural Design &amp; Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;3.Electric Power Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** To study the wind field characteristics of valley and col terrain and speedup effects in typical positions, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation methodology was employed. The results of an isolated hill obtained from CFD simulations, wind tunnel tests and codes were compared to validate the results of CFD simulation. Valley and col terrain were conducted by CFD. The speedup effects in typical positions of valley and col terrain were analyzed and some design suggestions were given for the top of hill and the inner side of hill bottom. The results show that the speedup effect on the top of hill is the most significant. The speedup effects on the cross-wind plane of an isolated hill are more significant than those on the along-wind plane. The results of CFD simulation match well with those obtained from wind tunnel test. The speedup effect on the top of col is more significant than those on valley and isolated hill. The speedup ratio at the inner side of hill bottom becomes greater with the decreasing distance between two hills. At the inner side of hill bottom under two adjacent hills condition, wind speedup ratio is less than the lower limit of the code for valley terrain and larger than the upper limit of that for col terrain when the distance between two hills is less than half diameter of hill bottom and the height above the hill is less than forty percent of hill height. The speedup effects on the top of hill are almost unchanged under various hill distance conditions. It is not commended to choose cols and tops of hills as the construction sites.

**Keywords:** CFD simulation; hilly terrain; speedup effect; wind field calculation; three dimensional hill

输电线路通常需要跨越各种山地地形,山区复杂的地形对风场产生较大影响,如“孤峰绕流效应”、“峡谷风效应”等.国内外规范对山地风场特性的规定采用对风速(风压)的修正系数来考虑,但给

出的公式只针对二维或三维的单个山体,对于两个山体形成的峡谷风效应和垭口风效应没有进行规定.

山地风场研究方法主要有现场实测、数值模拟<sup>[1]</sup>和风洞试验.现场实测的山体有加拿大的 Kettles 山<sup>[2]</sup>,现场实测数据可以作为风洞试验和 CFD 计算的基准.风洞试验方面,DeBray<sup>[3]</sup>研究越过单个斜坡和陡坡的流动,给出了上下游的风速模型;Jackson 等<sup>[4]</sup>提出了平面对称山体的风速剖面模型;

收稿日期:2015-10-29

基金项目:国家自然科学基金(51178425)

作者简介:姚剑锋(1992—),男,博士研究生;

楼文娟(1963—),女,教授,博士生导师

通信作者:沈国辉,ghshen@zju.edu.cn

李朝<sup>[5]</sup>针对若干种体型山体进行风洞试验,并与 CFD 结果进行比较;孙毅等<sup>[6]</sup>采用风洞试验研究不同坡度和高度山体的风速;沈国辉等<sup>[7]</sup>针对单山和双山风场进行风洞试验研究. CFD 数值计算方面, Kim 等<sup>[8]</sup>对两个二维山体前后排列的情况进行了研究;Breuer 等<sup>[9]</sup>研究了不同雷诺数下二维周期性山体周围风场的分布;徐洪涛等<sup>[10]</sup>利用 Fluent 软件对坝陵河特大桥桥址风环境进行数值模拟;肖仪清等<sup>[11]</sup>针对某复杂地形进行了 CFD 数值模拟,并将模拟结果与实测风速进行了比较. 以上研究大多针对单个山体的风场,针对双山风场特征研究并不多,尤其针对垭口地形风场.

基于以上背景,本文采取 CFD 数值模拟研究峡谷和垭口情况下的风场特性,将单个山体的 CFD 计算结果与风洞试验及规范进行对比以验证数值计算的有效性,分析峡谷和垭口地形的风场特性和典型位置的加速效应,最后给出峡谷和垭口地貌风场的设计建议.

## 1 峡谷地形与垭口地形的 CFD 建模

本文研究的山地地形有单山地形、峡谷地形和垭口地形. 用于数值模拟的山体,其轮廓形状通常取理想情况,如三角形、余弦形、高斯形、钟形等. 三角形山体在现实中存在的可能性并不高;钟形和高斯形山体理论上底部可扩散到无穷远,不利于数值建模;余弦形山体与大部分山丘形状接近,故本文采用该山形,其轮廓形状表达式为

$$Z(X, Y) = H \cos^2\left(\frac{\pi(X^2 + Y^2)^{1/2}}{D}\right). \quad (1)$$

式中: $Z$  为高度方向, $X, Y$  为水平方向, $D$  为山体底部直径, $H$  为山体高度. 本文对双山形成的峡谷和垭口地形如下定义:余弦形双山左右排列形成峡谷地形,见图 1(a),双山的山体发生重叠产生垭口地形,见图 1(b). 本文分别计算单山、峡谷地形和垭口地形的风场,山体高度  $H=100$  m,底部直径  $D=300$  m. 定义  $d$  为山脚间距,对于峡谷地形计算 5 组工况, $d=10, 50, 100, 200, 300$  m;对于垭口地形计算 6 组工况, $d=-10, -50, -100, -150, -200, -250$  m. 山脚间距  $d$  示意图见图 1,风向角取垂直双山连线方向.

计算域长度方向上游取  $3D$ ,下游取  $4.5D$ ;高度方向取  $8H$ ;宽度视工况而定,如单山取  $6D$ ,峡谷和垭口地形山的宽度随山体间距各有不同,所有工况的阻塞率均小于 3%. 流场内全部采用结构化六面体单元网格划分,网格尺寸在山体表面最密,再向外扩散. 图 2 为  $d=-50$  m 时垭口地形网格划分示意图,图中还给出了来流方向和  $X, Y, Z$  坐标定义. $Z$  为高度方向, $X$

为风来流方向, $Y$  为横风向,对于单山坐标原点位于底部圆心,对于双山工况则位于中心对称点.

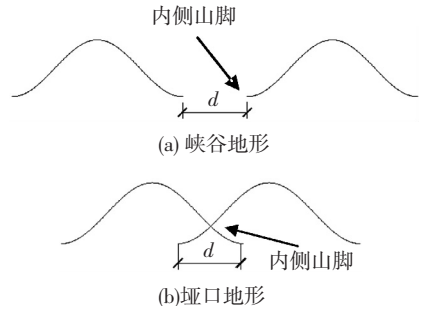


图 1 山脚间距示意

Fig.1 Diagram of distance between the foot of hills

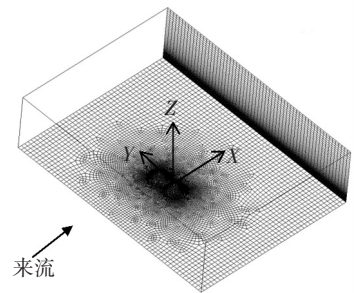


图 2 网格划分示意

Fig.2 Diagram of grid meshing

湍流模型采用被广泛认为适用于模拟大气边界层的 Realizable  $k-\varepsilon$  模型,来流平均风速和湍流度剖面依据 2012 版荷载规范<sup>[12]</sup>选取,地貌类别为 B 类, $\alpha=0.15$ , 10 m 高风速设为 30 m/s.

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格式.山体的地面粗糙高度设为 1 m,平地粗糙高度设为 0 m.各工况网格数量在 90 万到 340 万之间,每个工况计算耗时 1~2 h.

## 2 单山的 CFD 模拟结果及比较

### 2.1 单山的模拟结果

为定量表征加速效应的大小,定义加速比  $S$  为

$$S(Z) = \frac{u(Z)}{u_0(Z)}, \quad (2)$$

式中: $u(Z)$  表示距山地表面  $Z$  高度处的风速, $u_0(Z)$  表示距平地  $Z$  高度处的风速.

图 3(a)给出了单个山体过山轴线处顺风切面加速比,由图可知:1)最大加速比出现在山顶位置;2)在山顶处,加速比随着高度增加而减小并最终趋向为 1;3)在山体前部较低高度处有一较小的减速区;4)山体后部存在较大的尾流区,直到  $X=600$  m 左右尾流区的影响基本消除.图 3(b)给出了单个山

体横风剖面的加速比, 由图可知: 1) 在横风切面上山体表面附近位置基本都出现了加速效应; 2) 加速比在贴近山体位置最大, 距离山体越远加速比越趋近于 1; 3) 相比顺风切面, 横风切面的加速效应更加明显, 风受到山峰的阻挡, 向山峰两侧绕流, 形成气流加速的绕流效应。

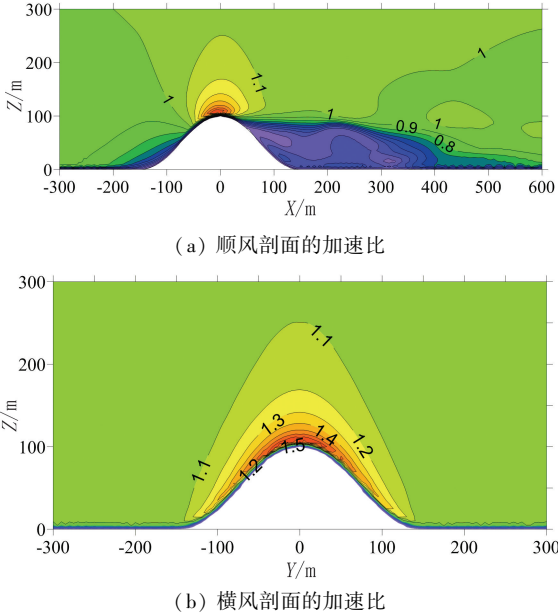


图 3 单山两个方向的加速比

Fig.3 Speedup ratio in two directions of isolated hill

图 4 给出了单山离地面(山体)表面距离为 20 m 和 100 m 的风速加速比, 可以发现: 1) 加速比在山顶位置最大, 加速效应最明显; 2) 加速比最小出现在山后尾流区位置; 3) 山前有一个较小的减速区; 4) 加速比随离地面(山体)表面距离增大而减小且趋近于 1, 尾流区在高度方向的影响减弱。

### 2.2 单山结果与风洞试验的比较

针对单山工况进行了风洞试验, 具体见文献 [7], 试验山体形状与本文一致, 模型的缩尺比为 1 : 500. 图 5 给出了 CFD 计算和风洞试验获得的单山山顶位置和横风向剖面半山腰处的加速比, 由图可知: 1) CFD 的结果非常光滑, 而风洞试验的结果较为离散, 但随高度变化趋势较吻合; 2) 山顶处 70 m 以上两者结果吻合较好, 70 m 以下 CFD 结果要大于风洞试验; 3) 横风向剖面半山腰处 100 m 以上吻合良好, 100 m 以下 CFD 结果要大于风洞试验; 4) 总体而言, CFD 结果与风洞试验吻合良好。

### 2.3 单山 CFD 结果与规范比较

图 6 给出了单山情况下 CFD 结果与各国规范比较, 由图可知: 1) 本文的 CFD 结果在整体上介于各国规范之间; 2) 离地 100 m 以上, 本文结果与日本规范很接近; 3) 从 100 m 至 50 m, 本文结果渐渐向美国规范和加拿大规范靠近, 在 50 m 以下,

本文结果与美国规范和加拿大规范比较接近。

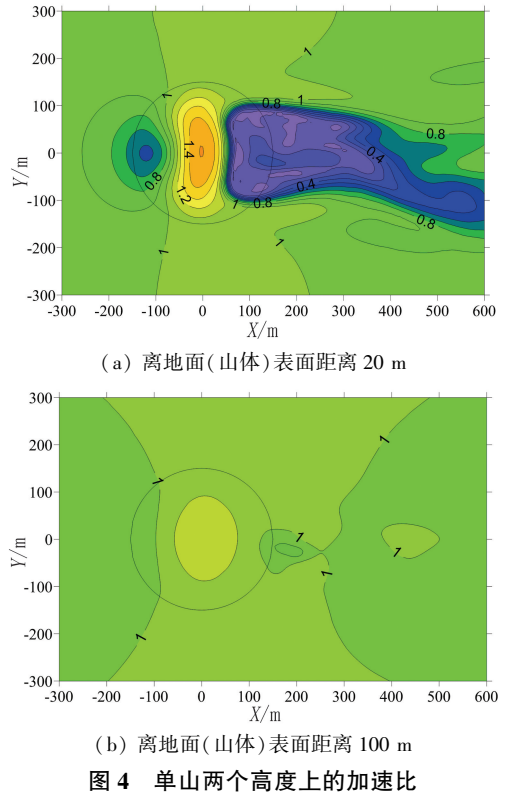


图 4 单山两个高度上的加速比

Fig.4 Speedup ratio of two heights on isolated hill

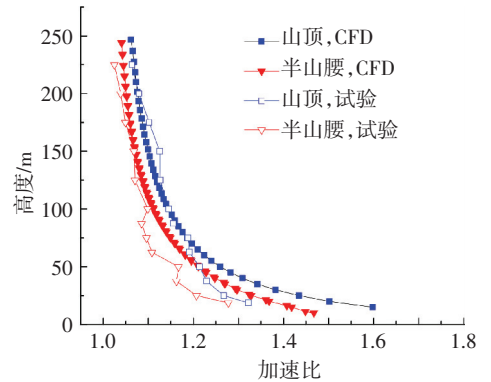


图 5 数值模拟与风洞试验结果对比

Fig.5 Comparison of results between CFD and wind tunnel test

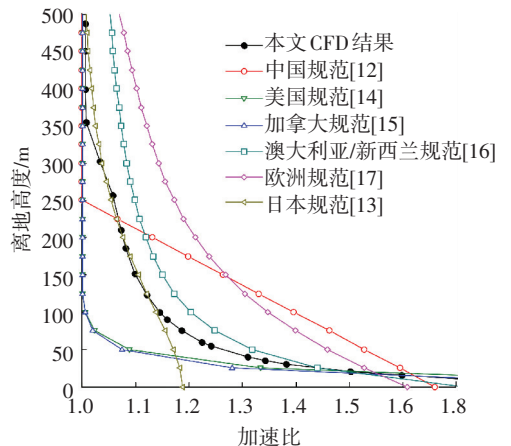


图 6 单山情况下 CFD 结果与各国规范对比

Fig.6 Comparison between CFD and the codes of various countries

### 3 峡谷地形的 CFD 模拟结果及比较

#### 3.1 峡谷地形的 CFD 模拟结果

图 7 给出了不同山体间距下横风剖面的加速比,由图可知:1)内侧山脚(见图 1)位置的风速均存在较明显的加速效应;2)加速比最大出现在山顶位置;3)单侧山体的加速比与山脚间距  $d$  的变化基本无关;4)随着山脚间距变大( $d$  变大),双山中心线即  $Y=0$  m 处的加速比逐渐减小为 1.

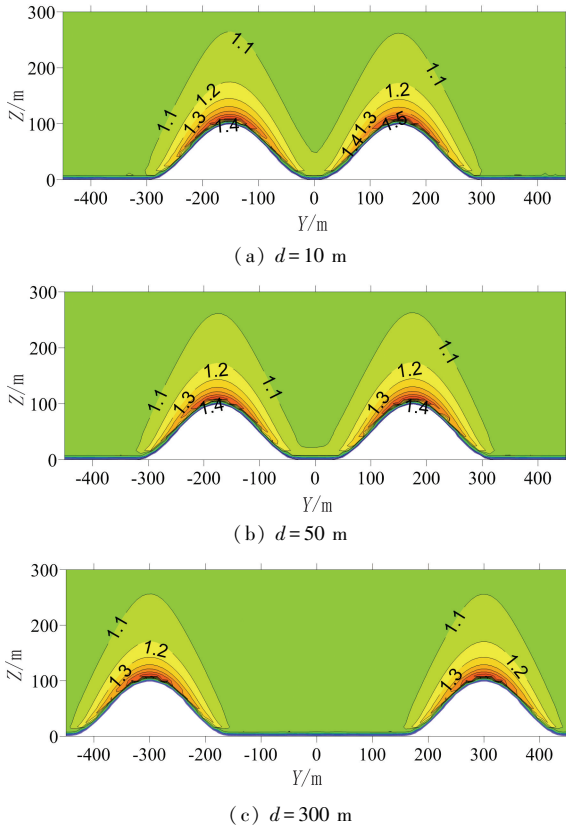


图 7 峡谷地形横风剖面的加速比

Fig.7 Speedup ratio on cross-wind plane of valley

图 8 给出了峡谷地形( $d=50$  m)离地面(山体)表面距离为 20 m 和 100 m 的风速加速比,可以发现:1)每座山的流场特征与单山情况下基本一致;2)山顶处的加速比相比单山情况下略大;3)双山各自的尾流区在山后相连,形成更大的尾流区.

图 9 给出了峡谷地形不同山脚间距内侧山脚位置的风速及加速比,由图可知:1)内侧山脚位置的风速均存在较明显的加速效应;2)山脚间距  $d=10$  m 时,加速效应最强;3)随着山脚间距增大,加速效应减弱;4)  $d=200$  m 和 300 m 的结果很接近,说明山脚间距在 200 m ( $2/3D$ ) 左右时,峡谷风效应已基本消除.

图 10 给出了峡谷地形山顶位置的风速及加速比,可知:1)5 种山脚间距  $d$  下,山顶位置的风速均存在较明显的加速效应;2)山脚间距  $d$  对两山山顶处的加速比影响较小,山脚间距  $d$  越小加速效应略有增强;

3)5 种工况下山顶处的加速比与单山工况差别不大.

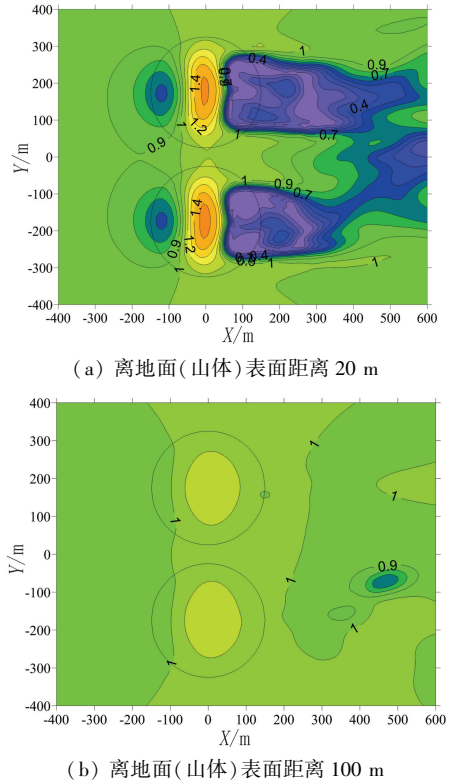


图 8 峡谷地形 ( $d=50$  m) 两个高度上的加速比

Fig.8 Speedup ratio of two heights of valley ( $d=50$  m)

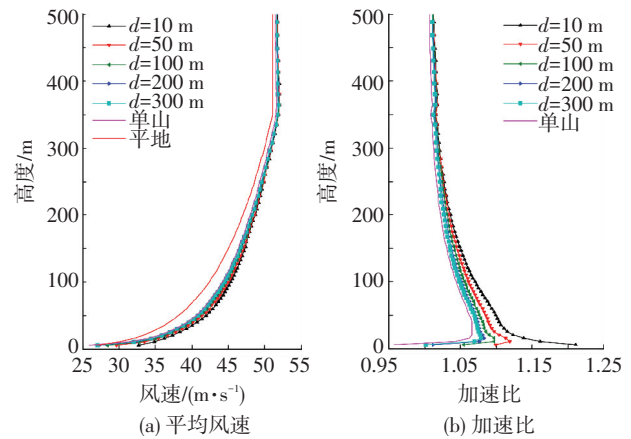


图 9 峡谷地形内侧山脚位置风速及加速比

Fig.9 Wind speed and speedup ratio at inner side of hill bottom on valley

#### 3.2 峡谷地形 CFD 结果与风洞试验的比较

在文献[7]给出双山地形的风洞试验计算结果,模型缩放比为 1 : 500,试验与 CFD 计算所取工况一致.图 11 给出了 3 种高度下数值模拟与风洞试验中内侧山脚与山顶位置的加速比,由图 11(a)的内侧山脚处加速比可知:1)在山脚间距小于 100 m 时风洞试验结果比 CFD 结果大;2)当间距为 100 m 到 200 m 左右时,两者结果差异不大;3)当间距大于 200 m 时,CFD 结果略大;4)风洞试验与 CFD 模拟结果最大相对误差为 6.25%.由图 11(b)的山顶处加速比可知:1)在 100 m 高度处,两者的加速比结果相差不多,在 100 m

以上略有差异但相差不多;2)两者在近地面处稍有差异,最大相对误差为3.62%;3)结合 2.2 节单山结果可知数值模拟结果具有较高的可信度。

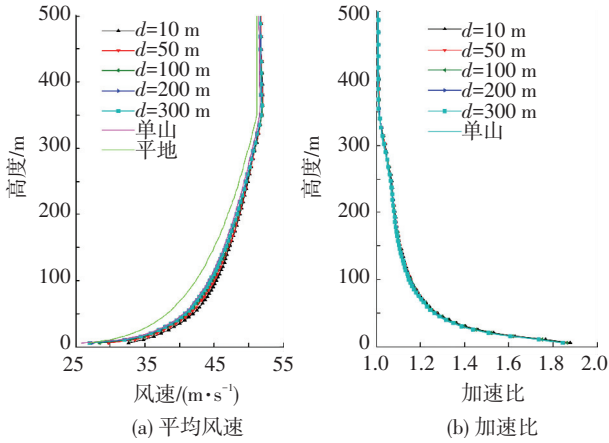
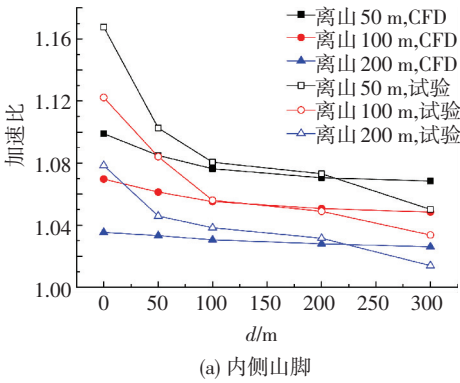
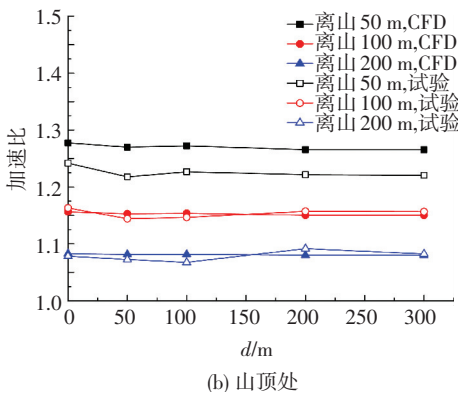


图 10 峡谷地形山顶位置风速及加速比

Fig.10 Wind speed and speedup ratio at the top of hill on valley



(a) 内侧山脚



(b) 山顶处

图 11 数值模拟与试验结果对比

Fig.11 Comparison of results between CFD and tests

### 4 垭口地形的 CFD 模拟结果

图 12 给出了垭口地形在山脚间距  $d = -50 m$ 、 $-150 m$ 和 $-250 m$ 时过山轴线横风切面内的水平风速加速比,由图可知:(1)山体表面存在显著的加速效应,在山顶的加速比最大;(2)山体上的加速比随着离表面距离的增大而减小;(3)垭口处存在一定的加速效应,且随着两山的靠近加速比越来越大;(4)当山体越来越接近时,垭口处的加速效应越来越

越趋近于山顶的加速效应。

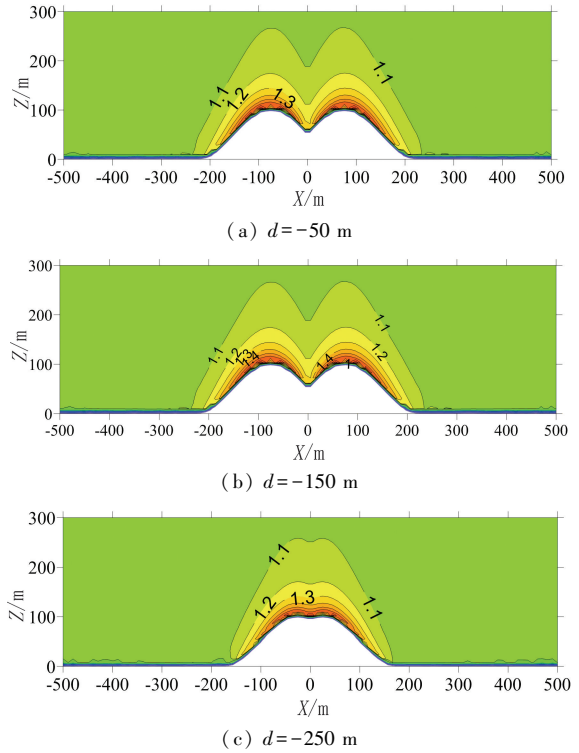


图 12 垭口地形横风剖面的加速比

Fig.12 Speedup ratio on cross-wind plane of col

图 13 给出了垭口地形( $d = -50 m$ )离地面(山体)表面距离为 20 m 和 100 m 的加速比,可以发现:1)其中一个山体的流场具有单山的变化特征,最大加速比出现在山顶位置;2)垭口地形的尾流区在山后连成一片形成更大尾流区;3)随高度增加,山体上加速比减小。

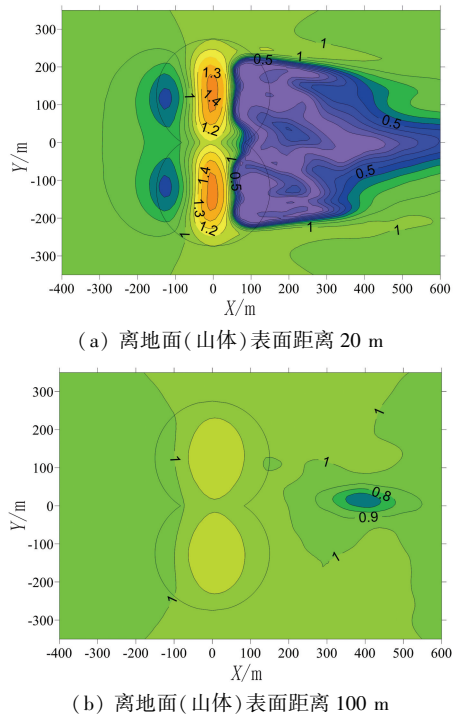


图 13 垭口地形两个高度上的加速比 ( $d = -50 m$ )

Fig.13 Speedup ratio of two heights of col ( $d = -50 m$ )

图 14 给出了垭口地形内侧山脚的风速及加速比,可知:1)6种山体间距下,内侧山脚处的风速均存在较明显的加速效应;2)随着山脚间距减小,加速效应增强。

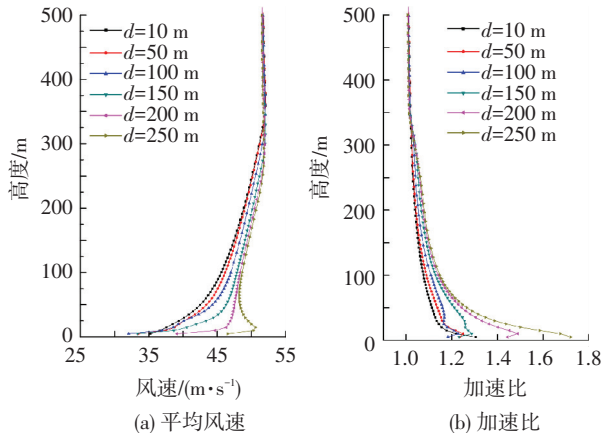


图 14 不同山体间距内内侧山脚位置风速及加速比

Fig.14 Wind speed and speedup ratio at inner side of hill bottom under different hill distances

## 5 峡谷和垭口地形风场的设计建议

### 5.1 内侧山脚处的加速比建议

荷载规范<sup>[12]</sup>提出:对于与风向一致的山口、谷口,风压高度变化系数的修正系数在 1.2~1.5 之间选取.由于风压是风速的平方,该修正系数折算为本文的加速比  $S$  为  $\sqrt{1.2} \sim \sqrt{1.5}$ ,  $\sqrt{1.2}$  和  $\sqrt{1.5}$  分别作为规范对山口、谷口加速比规定的下限与上限。

图 15 给出了不同高度处内侧山脚的加速比,图中已将垭口 ( $d = -250 \sim -10$  m) 和峡谷 ( $d = 10 \sim 300$  m) 的数据合在一起,由图可知:1)内侧山脚加速比随着两山距离变近 ( $d$  变小) 而增大,且均大于单山结果;2)对于同一山脚间距,越贴近地面加速比越大;3)山脚间距超过 200 m ( $d \geq 200$  m) 时内侧山脚各高度处加速比不再明显变化;4)峡谷地形 ( $d > 0$  m) 的风速加速比大部分小于规范的下限;5)垭口地形在  $d < -150$  m 且离山表面 40 m 之内时,加速比大于规范的上限,需引起设计的极大注意。

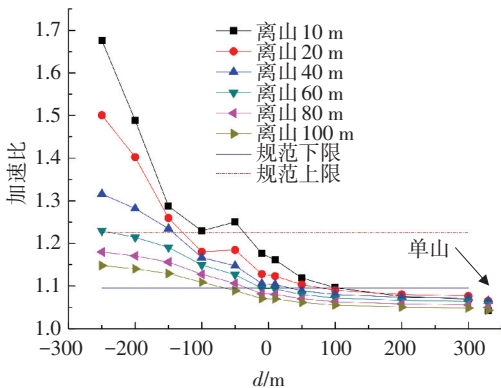


图 15 不同高度处内侧山脚加速比

Fig.15 Speedup ratio at inner side of hill at different heights

将图 15 中超过规范上限的工况列入图 16 中,用阴影表示,即  $d < -150$  m 且离山表面距离小于 40 m,为供设计参考,将其无量纲化,即垭口在山间距小于一半山体底部直径、离山表面高度低于 0.4 倍山体高度范围内.通常而言,由于垭口处的风加速比较大,不建议成为构筑物或建筑物选址地点。

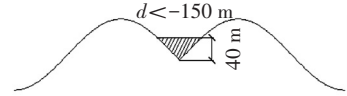


图 16 超过规范上限的垭口工况

Fig.16 Col cases beyond the upper limit of code

### 5.2 山顶处的加速比建议

图 17 给出了不同高度处一侧山顶处的加速比,由图可知:1)由于山体间距的变化所引起山顶各个高度处的加速比变化并不十分明显,最小值与单山工况接近;2)在离山表面 60 m 以下,山顶最大加速比出现在两山距离为 -150 m 至 50 m 时;3)在离山表面 60 m 以上,山脚间距影响不大。

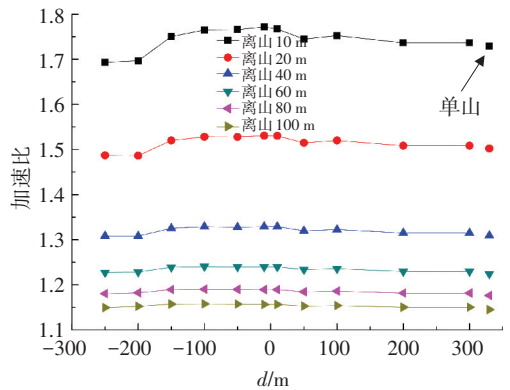


图 17 不同高度处的山顶加速比

Fig.17 Speedup ratio of the top at different heights

从图 17 还可看出,峡谷工况  $d \geq 200$  m 时和垭口工况  $d \leq -200$  m 时,加速比与单山工况非常接近,可以由图 18 的示意图予以解释:1)峡谷工况下,当山脚间距过大,两山之间的干扰作用降低,使得  $y \geq 200$  m 时,峡谷山顶结果已经趋向于单山情况;2)垭口工况下,  $d \leq -200$  m 时,由于双山过于靠近,使得两山形状接近单山,故垭口山顶处加速比也接近单山情况.一般而言,由于山顶具有相当大的加速效应,不管单山、峡谷还是垭口的山顶都不适合成为建筑物或者构筑物的选址地点。

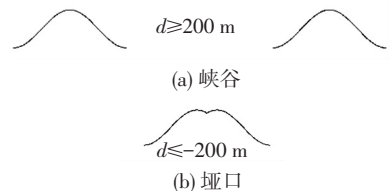


图 18 两种接近单山的情况

Fig.18 Two cases approaching to isolated hill

## 6 结 论

1) 单个山体的 CFD 计算结果表明: 山体横风切面的加速效应比顺风切面明显; 加速效应最大出现在山顶处; 风速加速比在靠近山体表面最大, 随高度增加而减小, 并逐渐趋近于 1; CFD 模拟与风洞试验结果吻合较好。

2) 峡谷地形的 CFD 计算结果表明: 加速比最大出现在山顶处, 且峡谷山顶加速比比单山略大; 单侧山体具有单山流场特征, 且与山脚间距变化关系不大; 峡谷山后尾流区较单山更大; 山体间距为  $2/3$  山体直径时, 峡谷效应基本消失。

3) 垭口地形的 CFD 计算结果表明: 山顶位置的加速比最大, 且比单山和峡谷情况大; 内侧山脚加速比随着两山靠近而增大, 慢慢接近山顶位置处的加速比; 垭口山后有较大的尾流区; 山体表面的加速比随着离表面距离的增大而减小。

4) 峡谷和垭口地形风场的设计建议: 对于内侧山脚, 峡谷地形的风加速比小于规范下限, 垭口地形在山间距小于一半山体底部直径、离山表面高度低于  $0.4$  倍山体高度处加速比大于规范所规定的上限; 对于山顶, 加速比与山脚间距大小关系不大; 不建议山顶、垭口处成为建筑物或者构筑物的选址地点。

## 参 考 文 献

- [1] 战庆亮, 周志勇, 葛耀君.  $Re = 3900$  圆柱绕流的三维大涡模拟 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12): 75-79.  
ZHAN Qingliang, ZHOU Zhiyong, GE Yaojun. 3-Dimensional large eddy simulation of circular cylinder at  $Re = 3900$  [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12): 75-79.
- [2] MICKLE R E, SALMON J R, TAYLOR P A. Kettles Hill 1984: velocity profile measurements over a low hill; AQRB-84-012-L [R]. Downsview, Canada: Atmospheric Environment Service, 1984
- [3] DE BRAY B G. Atmospheric shear flows over ramps and escarpments [J]. Industrial Aerodynamics Abstracts, 1973, 9: 1-4.
- [4] JACKSON P S, HUNT J C R. Turbulent wind flow over a low hill [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975, 101(430): 929-955
- [5] 李朝. 近地湍流风场的 CFD 模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
LI Chao. Study on CFD simulation of turbulence wind field near ground [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

- [6] 孙毅, 李正良, 黄汉杰, 等. 山地风场平均及脉动风速特性风洞试验研究 [J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 593-599.  
SUN Yi, LI Zhengliang, HUANG Hanjie, et al. Experimental research on mean and fluctuating wind velocity in hilly terrain wind field [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(5): 593-599.
- [7] 沈国辉, 姚旦, 余世策, 等. 单山和双山风场特性的风洞试验 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5): 805-812. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2016.05001.  
SHEN Guohui, YAO Dan, YU Shice, et al. Investigation of wind field characteristics on an isolated hill and two adjacent hills using wind tunnel tests [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(5): 805-812. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2016.05001.
- [8] 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.
- [9] 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 and Fluids, 2009, 38(2): 433-457.
- [10] 徐洪涛, 马存明, 马顺康, 等. 山区桥梁桥址风环境数值风洞研究 [J]. 世界桥梁, 2011(3): 61-64.  
XU Hongtao, MA Cunming, MA Shunkang, et al. Numerical wind tunnel research of wind environment at sites of bridges in mountainous region [J]. World Bridges, 2011(3): 61-64.
- [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 Yiqing, LI Chao, OU Jinping, 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.
- [12] 建筑结构荷载规范: GB50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Load code for the design of building structures: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [13] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on buildings [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [14] Minimum design loads for buildings and other structures: ANSI/ASCE 7-10 [S]. New York: ASCE, 2010.
- [15] Canadian commission on building and fire codes. national building code of Canada (NBC) [S]. Ottawa: National Research Council of Canada, 2005.
- [16] Australian/New Zealand standard: AS/NZS 1170.0 [S]. Sydney: AS/NZS, 2002.
- [17] European standard. Actions on structures: EN1991-1-4 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

(编辑 赵丽莹)