

文章编号:1674-2974(2016)07-0008-08

## 峡谷地形平均风速特性与加速效应\*

楼文娟<sup>1†</sup>, 刘萌萌<sup>1</sup>, 李正昊<sup>1</sup>, 章李刚<sup>2</sup>, 卞荣<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 结构工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 国网浙江省电力公司 经济技术研究院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:**采用计算流体力学(CFD)方法建立多个数值模型,通过与风洞试验的对比分析验证了数值模拟结果的可靠性,较系统地研究并详细分析了峡谷长度、山顶间距、山脉坡度3种地貌因素对平均风加速效应的影响。结果表明:山脉顶部加速效应主要受山脉坡度的影响,在近地面内坡度越大加速效应越明显;峡谷内部加速效应受多种地貌因素影响且变化趋势较为复杂,必须考虑峡谷侧坡边界层的影响和流动的三维效应,当峡谷长度越短、山顶间距越小、山脉坡度越大时,迎风谷口处在近地面内的加速效应越明显。最后计算出典型峡谷的风压地形修正系数,并与我国建筑结构荷载规范进行对比。

**关键词:**峡谷;山脉;平均风速;加速效应;计算流体力学(CFD);数值模拟

**中图分类号:**TU973.32

**文献标识码:**A

## Research on Mean Wind Speed Characteristics and Speed-up Effect in Canyon Terrain

LOU Wen-juan<sup>1†</sup>, LIU Meng-meng<sup>1</sup>, LI Zheng-hao<sup>1</sup>, ZHANG Li-gang<sup>2</sup>, BIAN Rong<sup>2</sup>

(1. Institute of Structural Engineering, Zhejiang Univ, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 2. Research Institute of Economic Technology, Zhejiang Provincial Corporation of State Grid, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

**Abstract:** Multiple numerical models were established by Computational Fluid Dynamics (CFD) method, and the reliability of the numerical results was also verified by the comparison with that of a wind tunnel test. The CFD analysis was then systematically carried out to study the influence of three geomorphological factors, the length of the canyon, distance between two peaks, and slope of the mountain, on the mean wind speed-up effect. The analysis results showed that the speed-up effect at the mountaintop was significantly affected by the slope of the mountain. The larger the slope was, the more significant the speed-up effect was in the near surface. Furthermore, the speed-up effect inside the canyon was influenced by the multiple geomorphological factors, and the variation trends were complicated. Therefore, the influence of the side slope boundary layer of the canyon and the three-dimensional effect of airflow should be considered. When the length of the canyon and the distance between two peaks decreased, and the slope of the mountain increased, the speed-up effect at the windward canyon entrance was more obvious in the near surface. Finally, the wind pressure terrain correction coefficient of the typical canyon was calculated and compared with the prescription of Chinese design code for building structures.

**Key words:** canyon; mountain range; mean wind speed; speed-up effect; computational fluid dynamics

\* 收稿日期:2015-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378468,51178424), National Natural Science Foundation of China(51378468,51178424); 国家电网公司研究项目(5211JY13002A)

作者简介:楼文娟(1963-),女,浙江绍兴人,浙江大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: louwj@zju.edu.cn

(CFD); numerical simulation

两座山脉并排形成峡谷是较为常见的山区地形. 当气流由空旷地区流入峡谷时, 悬殊的高差为其形成了天然通道, 受狭管效应<sup>[1]</sup>影响, 风速显著增大. 对建设在山区中的结构物而言, 这种加速效应会使风致破坏事故的发生概率升高, 特别是对于风力汇聚的谷口、山顶等抗风不利区域, 其所遭受的破坏程度更为严重, 因此研究该类地形下的风速特性具有重大意义.

目前针对山地风场的研究大多是基于简化的二维或三维轴对称山体: 国外学者 Jackson 等<sup>[2]</sup>采用理论与数值计算相结合的方法, 提出了适用于二维光滑低矮小山的加速效应解析算法, 并通过风洞试验予以验证; Taylor 等<sup>[3]</sup>提出了被称为“原始算法”(Original Guidelines)的加速效应简化计算公式; Weng 等<sup>[4]</sup>运用边界层数值模拟研究了山体几何尺寸和地面粗糙度对加速效应的影响. 国内学者李正良等<sup>[5-8]</sup>通过数值模拟和风洞试验研究了坡度、山高、地貌、山体形状等多种因素对山地风场的影响, 提出平均风加速效应的对数律计算模型以及沿山坡的竖向线性插值模型.

然而对具有一定长度的峡谷地形的研究尚处于起步阶段: 国外学者 Bullard 等<sup>[9]</sup>通过数值模拟和风洞试验研究了峡谷走向对气流运动趋势的影响; 庞加斌<sup>[10]</sup>通过实地观测结合风洞试验, 提出峡谷风速主要受峡谷风、越山风和遮挡 3 大类地形效应影响, 此外, 与陈政清<sup>[11]</sup>、李永乐<sup>[12]</sup>等人的研究一致, 均指出峡谷内风速具有明显的三维特征; 陈平<sup>[13]</sup>通过数值模拟研究了峡谷风场随山高、坡度和风向角的变化规律; 祝志文<sup>[14]</sup>采用数值模拟研究了不同来流条件下峡谷地貌的气流运动.

总体来说, 目前对峡谷地形的研究过于简单, 或是以某真实峡谷为研究对象而不具有普适性, 或是对简化模型的研究中考虑的地貌因素过少, 并未涉及峡谷长度、山顶间距等对风速特性的影响, 因此尚缺乏系统的研究与分析. 本文以更贴近实际地形的具有一定长度的峡谷为研究对象, 结合风洞试验与 CFD(Computational Fluid Dynamics)数值模拟方法, 研究并详细分析了峡谷长度、山顶间距及山脉坡度 3 种地貌因素对平均风加速效应的影响; 最后计算出典型峡谷的风压地形修正系数, 并与我国建筑结构荷载规范进行对比分析, 为山地地形中结构物的抗风设计提供借鉴.

## 1 数值模拟参数及模拟工况

建立了多个变参数模型, 采用 CFD 软件 FLU-ENT14.5 进行模拟计算, 并通过与风洞试验结果的对比分析验证数值模拟结果的可靠性.

### 1.1 模拟工况及测点布置

山脉横断面采用与实际地形最为接近的余弦形山体, 其在二维平面内的轮廓表达式如式(1)所示, 示意图如图 1 所示.

$$y = H \cos^2\left(\frac{\pi x}{D}\right), |x| \leq \frac{D}{2}. \quad (1)$$

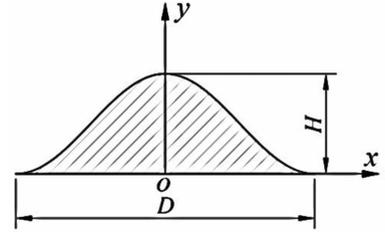


图 1 余弦形山体示意图

Fig. 1 Schematic of the cosine-shaped mountain

在此基础上给出峡谷地形的三维轮廓表达式如式(2)所示, 按式(2)建立起的三维模型如图 2 所示, 其中:  $H$  为山脉高度;  $D$  为山脉底部直径, 山脉坡度可表示为  $2H/D$ ; 两山顶之间的距离为  $W$ ,  $W=D$  时表示两山山脚紧贴; 以双山截面形状为基准拉伸长度  $L$  即表示峡谷长度.

$$Z =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H \cos^2 \left\{ \frac{\pi \sqrt{X^2 + \left[ Y - \text{sign}(Y) \cdot \frac{W}{2} \right]^2}}{D} \right\}, \\ -\frac{D}{2} \leq X \leq 0; \\ H \cos^2 \left\{ \frac{\pi \left[ Y - \text{sign}(Y) \cdot \frac{W}{2} \right]}{D} \right\}, 0 < X < L; \\ H \cos^2 \left\{ \frac{\pi \sqrt{(X-L)^2 + \left[ Y - \text{sign}(Y) \cdot \frac{W}{2} \right]^2}}{D} \right\}, \\ L \leq X \leq L + \frac{D}{2}. \end{array} \right. \quad (2)$$

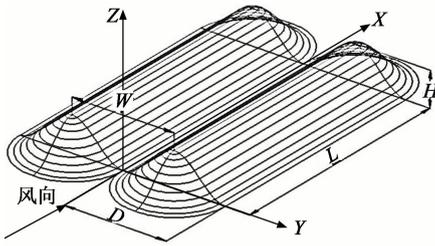


图2 峡谷地形三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of canyon terrain

主要考虑的地貌因素有:峡谷长度、山顶间距和山脉坡度,其中坡度的变化通过改变山脉底部直径来实现,山脉高度固定取为 100 m. 以  $H=100\text{ m}$ ,  $L=300\text{ m}$ ,  $W=300\text{ m}$ ,  $D=300\text{ m}$  为典型峡谷参数,其他参数的变化以此为基础. 来流风向仅选取与山脉走向一致的情况,此时峡谷中加速效应最为明显<sup>[13]</sup>,文中所有结论也都是基于该风向下得到的. 数值模拟工况见表 1.

表1 数值模拟工况

Tab. 1 Conditions of numerical simulation

工况序号	固定参数/m	变化参数	备注
1	$L:300; D:300$	单山	典型单山脉
2	$L:300; D:300; W:300$	双山	典型峡谷
3—9	$D:300; W:300$	$L:0(0H), 100(1H), 200(2H), 400(4H), 500(5H), 600(6H), 900(9H)$	考虑不同峡谷长度
10—14	$L:300; D:300$	$W:350(7D/6), 400(4D/3), 500(5D/3), 600(2D), 900(3D)$	考虑不同山顶间距
15—18	$L:300; W:300$	$D:200(1.000), 400(0.500), 600(0.333), 900(0.222)$	考虑不同山脉坡度

注:直径  $D$  后括号内数字为对应的坡度值  $2H/D$ .

## 1.2 网格划分及模型建立

计算域高度固定取为 600 m ( $6H$ ), 以保证计算域内流体可充分发展; 模型底部尺寸变化较大, 计算域长度和宽度也随之变化: 上游长度(由迎风侧山脚至入口)取为 3 倍模型长度, 下游长度(由背风侧山脚至出口)取为 5 倍模型长度; 宽度取为 3 倍模型宽度, 对所有模型控制阻塞比不超过 3%. (见图 3)

网格划分及模型建立均在 CFD 前处理软件 ICEM 中完成, 采用结构化六面体网格对计算域进行离散处理: 气流通经山体附近时变化较为复杂, 所以对山体表面网格进行加密处理, 最大网格尺寸为 8 m, 并以 1.1 的增长率由山体向外扩散, 水平最大尺寸为 40 m; 为保证近地面的计算精度, 竖向首层网格高度取为 1 m, 增长率为 1.05.

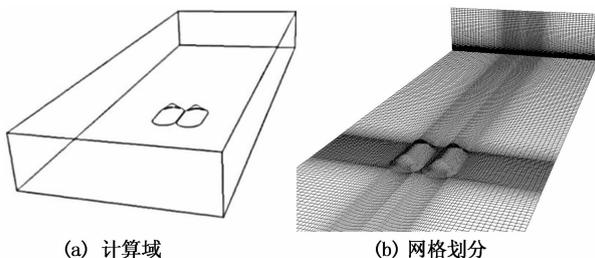


图3 计算域及网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of computational domain and mesh generation

## 1.3 模拟主要参数

大气边界层的湍流度较大, 本文采用被广泛认

为适用于模拟大气边界层的 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型. 壁面函数选用考虑压力梯度的非平衡壁面函数 (Non-Equilibrium Wall Functions), 可计算分离、再附以及撞击问题. 计算域入口定义为速度入口 (Velocity Inlet), 可定义入口流场速度和相关流动变量; 出口为流动速度和压强均为未知的自由出口 (Outflow); 两侧和顶部采用零通量的对称边界 (Symmetry); 平地及山体表面为固定壁面 (Wall)<sup>[15]</sup>. 考虑实际地面植被的影响, 取山体和平地表面粗糙高度分别为 1.0 m 和 0.5 m.

入口边界条件主要包括平均风速剖面和湍流剖面. 其自保持性<sup>[16]</sup>, 即风剖面在未达到目标物之前能在流场中保持不变, 将对数值计算结果产生极大影响. 当采用 CFD 中的经验公式定义湍流剖面时, 计算域内的涡黏数值偏高, 从而导致入口边界条件不能在流场中较好保持, 因此对该经验公式进行调整<sup>[17]</sup>, 多次试算后确定速度入口的边界条件(平均风速  $U$ , 湍流动能  $k$  及湍流耗散率  $\epsilon$ ) 如式(3)~(5)所示, 通过 FLUENT 的 UDF (User Defined Functions) 接口直接定义.

$$U(z) = U_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^a, \quad (3)$$

$$k(z) = 0.5 [U(z) \times I(z)]^2, \quad (4)$$

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

式中:  $z_0$  和  $U_0$  分别表示标准参考高度和标准参考高

度处风速,取为 10 m 和 10 m/s;对 B 类地貌,地面粗糙度指数  $\alpha$  取为 0.15;  $I(z)$  表示  $z$  高度下的湍流度,  $L_u$  为湍流积分尺度,取值均参照日本规范<sup>[18]</sup>;  $C_\mu = 0.09, K = 0.42$ . 该入口边界条件下各位置的平均风速剖面和湍流剖面分别如图 4 和图 5 所示.

分析图 4 和图 5 可知,平均风速剖面具有较好的自保持性,而湍流剖面则不能实现自保持. 文中主要针对平均风进行研究,应优先考虑平均风剖面的自保持性,且湍流剖面对平均风的计算结果影响较小,因此可暂时降低对入口湍流剖面的要求<sup>[17]</sup>.

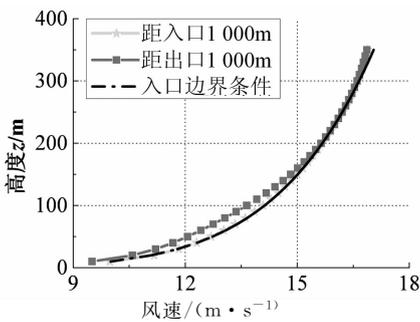
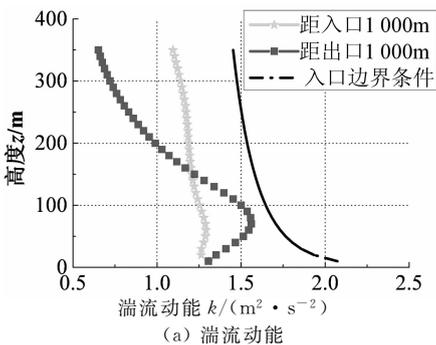
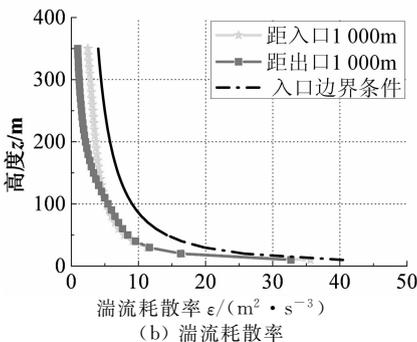


图 4 各位置的平均风速剖面

Fig. 4 Mean wind speed profile of each position



(a) 湍流动能



(b) 湍流耗散率

图 5 各位置的湍流剖面

Fig. 5 Turbulence profile of each position

### 1.4 主要测点布置

在山脊线、山腰线和峡谷中轴线上各均匀布置 3 个测点,共计 9 个主要测点,如图 6 所示.

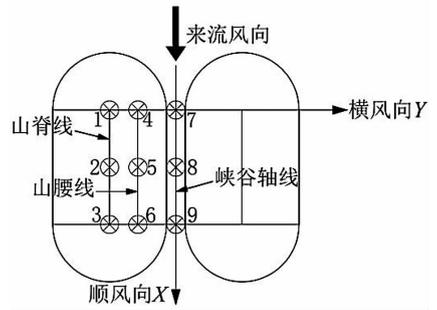


图 6 主要测点布置图

Fig. 6 The main points layout plan

### 1.5 与风洞试验的对比

为与数值模拟计算结果进行对比分析,选取工况 1 典型单山脉与工况 2 典型峡谷,于浙江大学边界层风洞实验室(ZD-1)中进行风洞试验,模型缩尺比为 1 : 500,保证阻塞率小于 5%. 采用尖塔涡流发生器、挡板和粗糙元组合的被动模拟方法模拟 B 类标准风剖面作为初始来流,标准参考高度和标准参考高度处风速取为 10 m 和 10 m/s. 试验流场的风速剖面采用小尺寸管式五孔探针进行测量. 试验模型布置如图 7 所示. 经多次调试后获得与规范吻合良好的 B 类风剖面,如图 8 所示,从而保证与 CFD 初始流场一致.

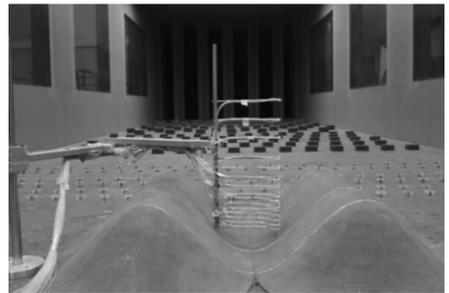


图 7 风洞试验模型

Fig. 7 Wind tunnel test model

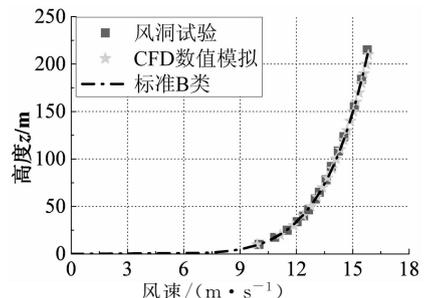


图 8 初始流场模拟

Fig. 8 Simulation of initial flow field

对多个测点位置的平均风速剖面进行了对比,

限于篇幅,以下仅给出测点布置区域内呈对角关系的测点3及测点7对比结果,如图9所示。

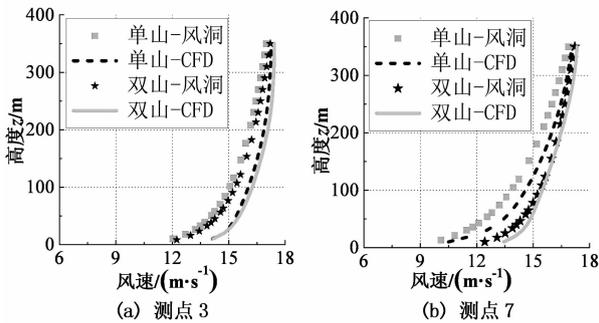


图9 测点平均风速剖面对比

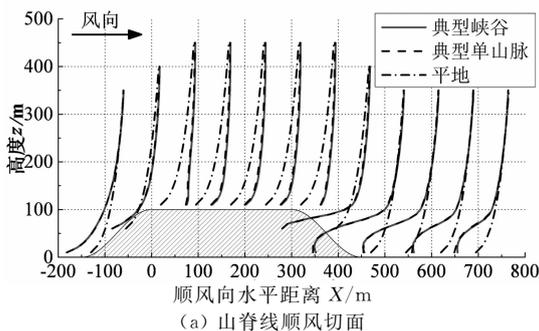
Fig. 9 Comparison of mean wind speed profile of the points

分析图9可知,CFD结果与风洞结果变化趋势吻合较好,在近地面处略大于风洞,最大速度差值约为2 m/s,考虑到CFD与风洞试验模型表面粗糙度具有一定差异以及试验误差等因素的影响,该速度差值处于可接受范围内,因此可认为本文中的CFD数值模拟结果具有较高的可靠性。

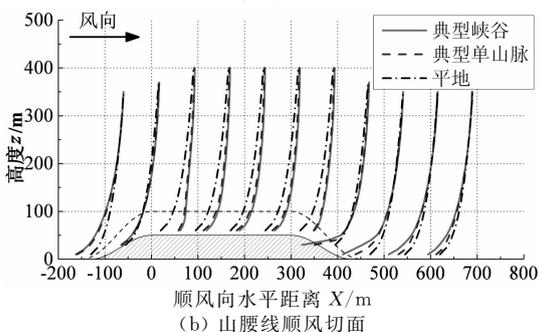
## 2 峡谷地形风速特性与加速效应

### 2.1 典型峡谷地形的风速剖面

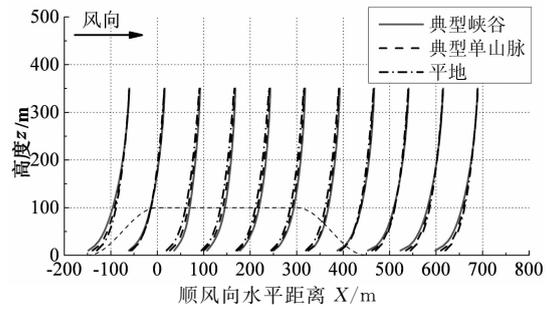
为详细分析其平均风速空间分布特征,分别在经山脊线、峡谷内部山腰线以及峡谷轴线的顺风切面内,沿顺风向以75 m水平等间距提取出多点风速剖面,并与相同参数的单山脉地形进行对比,如图10所示。



(a) 山脊线顺风切面



(b) 山腰线顺风切面



(c) 峡谷轴线顺风切面

图10 典型峡谷地形与典型单山脉地形的风速剖面  
Fig. 10 Wind speed profile of typical canyon terrain and typical single mountain range terrain

分析图10可知,峡谷地形显著地改变了来流近地面的风速特性,使其空间分布呈现显著的不均匀性:1)沿山脊线、山腰线以及峡谷轴线的分布趋势相同,均在整个峡谷长度范围内( $X=0\sim 300$  m)风速增大,并且在迎风谷口处(对应 $X=0$  m处)加速效应最显著,在迎风坡山脚和山后尾流区风速减小形成减速区,且山后减速程度更为剧烈,远离山体后该现象又逐渐减弱;2)沿山脊线、山腰线以及峡谷轴线的风速变化幅度不同,山脊最强、山腰次之、峡谷轴线最弱;3)与单山脉相比,沿山脊线并无明显差异,沿山腰线及峡谷轴线受狭管效应影响而风速增幅变大,且在峡谷轴线附近最为显著。

### 2.2 各地貌因素对加速效应的影响

为定量分析各地貌因素对平均风加速效应的影响程度,引入一个无量纲化的参数——加速比 $S$ ,计算式如式(6)所示。

$$S = \frac{U(z)}{U_0(z)} \quad (6)$$

式中: $U(z)$ 表示山体地面以上 $z$ 高度处的风速; $U_0(z)$ 表示平地地面以上 $z$ 高度处的风速。

同时,由2.1节中分析结果可知,迎风谷口处的加速效应最为显著,下文中将测点1,4和7称为典型测点。

#### 2.2.1 峡谷长度

与以往研究不同,本文考虑了不同峡谷长度的影响,分别取 $L$ 为 $0H$ ,  $1H$ ,  $2H$ ,  $3H$ ,  $4H$ ,  $5H$ ,  $6H$ ,  $9H$ ,共计8种情况。研究结果表明峡谷长度的变化对峡谷底部加速效应影响最显著,对山脉顶部基本无影响。

不同峡谷长度下的测点7近地面内加速比如图11所示:1)加速效应随峡谷长度增加而减弱,但减弱幅度逐渐减小;2)当峡谷长度增长至 $3H$ 后加速比变化趋于稳定。

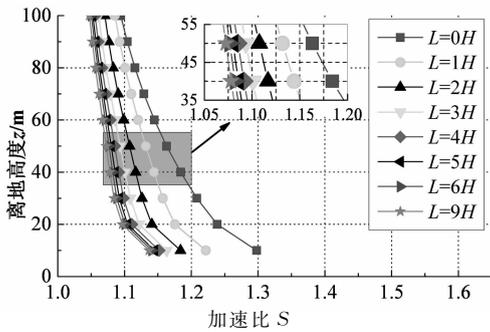


图 11 不同峡谷长度下测点 7 加速比  
Fig. 11 Speed-up ratio of point 7 under different lengths of the canyon

不同山顶间距下的测点 7 近地面内加速比如图 13 所示:1)随着山顶间距的增大,加速效应显著减弱;2)当山顶间距达到 3D 后,可认为基本已无加速效应。

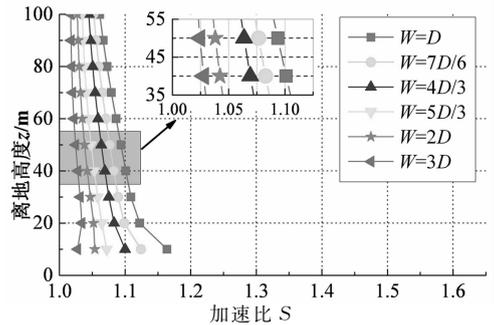


图 13 不同山顶间距下测点 7 加速比  
Fig. 13 Speed-up ratio of point 7 under different distances between two peaks

峡谷内部沿轴线方向的加速比变化曲线如图 12 所示,各点加速效应均随着峡谷长度的增加而减弱:1)当峡谷长度较短时,加速比沿轴线逐渐减小;2)峡谷长度增长至 3H 后,加速比沿轴线先减小再增大;3)继续增长至 5H 后,峡谷内部分区域处于减速状态,且该减速区域范围随峡谷长度增大而增大.分析该现象的原因,主要是因为峡谷越长,内部与气流接触的面积越大,山体摩擦作用对风能的耗散就越显著,因此加速效应衰减越快,而在靠近出风谷口处的地形有利于气流的加速扩散,该影响程度要强于两侧山体的摩擦作用,使得加速效应在靠近出风谷口处又具有一定幅度增强.此外,上述分析还可对图 11 现象进行解释,当峡谷长度越短时,测点 7(迎风谷口处)受到出风谷口处气流加速扩散的影响越大,从而导致加速效应越显著,而当峡谷具有一定长度后,测点 7(迎风谷口处)与出风谷口处距离较远,受到的影响较微弱,使得加速比变化趋于稳定。

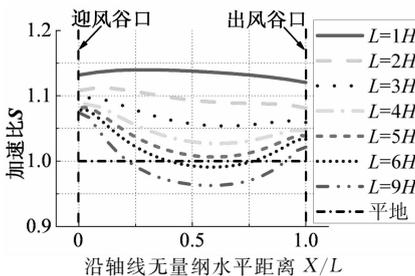


图 12 不同峡谷长度下峡谷内 50 m 高度处加速比  
Fig. 12 Speed-up ratio in the canyon at 50 m height under different lengths of the canyon

峡谷内部沿轴线方向的加速比变化曲线如图 14 所示:1)各点均处于加速状态,当山顶间距 $\leq 4D/3$ 时,加速比沿轴线逐渐减小,而当山顶间距继续增大时,加速比沿轴线无明显变化;2)峡谷前 25% 的长度范围内,山顶间距越小加速效应越显著,后 75% 的长度范围内,山顶间距处于 7D/6 至 5D/3 时加速效最显著.与前述相同,这是由于峡谷中气流的流动受到狭管效应和山体摩擦耗能的综合影响。

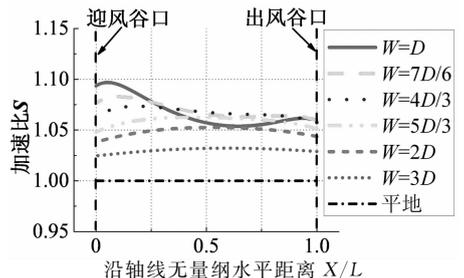


图 14 不同山顶间距下峡谷内 50 m 高度处加速比  
Fig. 14 Speed-up ratio in the canyon at 50 m height under different distances between two peaks

### 2.2.2 山顶间距

为考虑山顶间距对加速效应的影响,分别取 W 为 D, 7D/6, 4D/3, 5D/3, 2D, 3D, 共计 6 种情况.与峡谷长度相似,研究结果表明山顶间距的变化对峡谷底部加速效应影响最显著,对山脉顶部基本无影响。

### 2.2.3 山脉坡度

为考虑山脉坡度对加速效应的影响,山高 H 固定取为 100 m,底部直径 D 分别取为 200, 300, 400, 600, 900 m,对应的山脉坡度 2H/D 分别为 1.000, 0.667, 0.500, 0.333, 0.222,共计 5 种情况.研究结果表明山脉坡度的变化对峡谷内部及山脉顶部加速效应均有较大影响。

不同山脉坡度下的典型测点近地面内加速比如图 15 所示:山脉坡度变化对加速效应的影响规律较为复杂,各测点加速比曲线均在某固定高度有统一交点,山顶处(测点 1)约为 50 m 高度,峡谷内部(测点 4,测点 7)约为 75 m 高度,在该高度以内各点加

速效应随坡度的增大而增强,超出该高度后变化规律则相反。

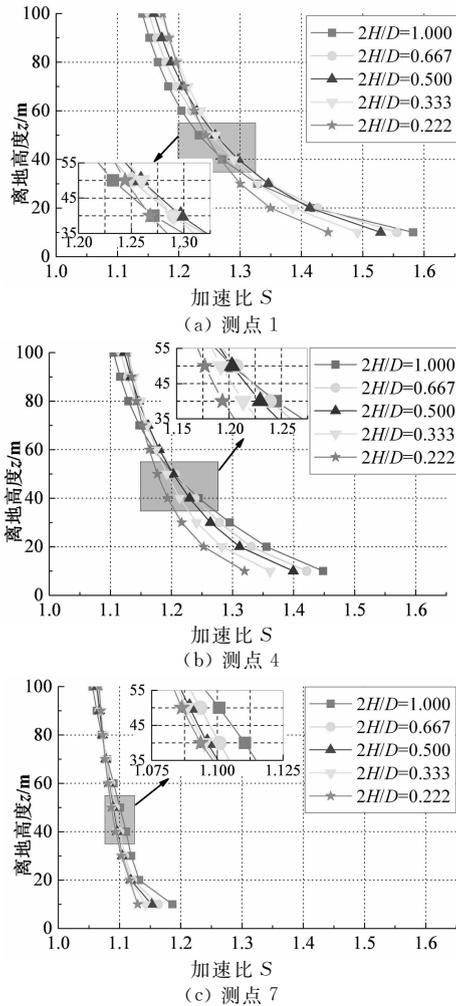


图 15 不同山脉坡度下典型测点加速比  
Fig. 15 Speed-up ratio of the typical points under different slope of the mountain

峡谷内部沿轴线方向的加速比变化曲线如图 16 所示;与不同山顶间距下的情况类似,即整个峡谷内均处于加速状态,且峡谷前段和后段的加速比随坡度变化规律相反,山脉坡度越小,加速比沿轴线变化越平缓。

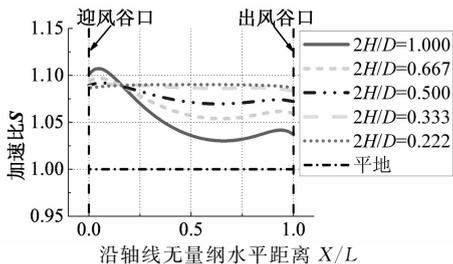


图 16 不同山脉坡度下峡谷内 50 m 高度处加速比  
Fig. 16 Speed-up ratio in the canyon at 50 m height under different slope of the mountain

### 2.3 与我国规范中地形修正系数的对比

针对与风向一致的谷口、山口处的加速效应,我国建筑结构荷载规范直接给出取值范围为 1.20~1.50 的风压地形修正系数<sup>[19]</sup>,并未考虑各地貌因素的影响,对该系数的取值方法过于简单,关于谷口与山口的概念也较为模糊.因此,本节提取出典型峡谷(工况 2)中各主要测点的风速剖面,在此基础上计算各测点的风压地形修正系数,如图 17 所示。

从图 17 中可看出:1)风压地形修正系数在空间的分布具有明显的三维效应,沿高度方向和由山脊到峡谷轴线的横风向逐渐减小,顺风向变化规律则较为复杂,沿山脊线和山腰线均先减小再增大,沿峡谷轴线逐渐减小,但均在迎风谷口位置达到最大,规范中仅给出统一的界限而并未考虑整个峡谷内部地形修正系数变化规律;2)规范给定的风压地形修正系数取值界限仅对部分高度有效,在近地面 50 m 内偏不安全,在 200 m 以上的高空则过于保守。

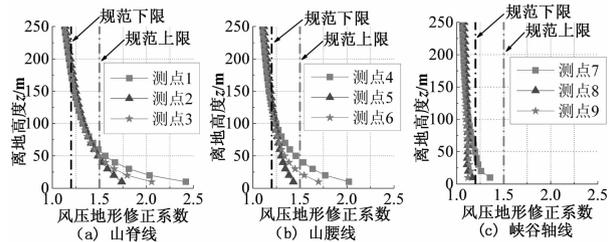


图 17 典型峡谷各测点风压地形修正系数  
Fig. 17 Wind pressure terrain correction coefficient of the points in typical canyon

### 3 结论

本文以具有一定长度的峡谷地形为研究对象,详细分析了峡谷长度、山顶间距及山脉坡度 3 种地貌因素对加速效应的影响,主要结论如下:

- 1) 典型峡谷地形中近地面风速空间分布呈现显著的不均匀性,山脉顶部和峡谷内部均为加速区域,沿顺风向在迎风谷口位置处加速效应最为显著。
- 2) 山脉顶部加速效应主要受山脉坡度的影响,在近地面 50 m 内随着坡度的增大而增大,超过该高度后变化规律则相反。
- 3) 峡谷内部加速效应受多种地貌因素影响且变化规律较为复杂,必须考虑峡谷侧坡边界层的影响和流动的三维效应,当峡谷长度越短、山顶间距越小、山脉坡度越大时,迎风谷口处在近地面内的加速效应越明显。
- 4) 风压地形修正系数在空间中的分布具有明显

的三维特征,规范中仅给出统一的界限而并未考虑整个峡谷内部的变化规律,同时,该取值界限仅对部分高度有效,在近地面 50 m 内偏不安全,在 200 m 以上的高空则过于保守。

## 参考文献

- [1] 张相庭. 地貌新分类及在高耸结构抗风分析中的应用研究[J]. 特种结构,1996,13(3):11-14.  
ZHANG Xiang-ting. New landscape classification and analysis of application in high structural for wind resistance[J]. Special Structures,1996,13(3):11-14. (In Chinese)
- [2] JACKSON P S, HUNT J C R. Turbulent wind over a low hill [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975,101:929-955.
- [3] TAYLOR P A, LEE R J. Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features [J]. Climatological Bulletin,1984,18(2):3-22.
- [4] WENG W, TAYLOR P A, WALMSLEY J L. Guidelines for airflow over complex terrain: model developments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 86(2):169-186.
- [5] 李正良,孙毅,魏奇科,等. 山地平均风加速效应数值模拟[J]. 工程力学,2010,27(7):32-37.  
LI Zheng-liang, SUN Yi, WEI Qi-ke, *et al.* Numerical simulation of mean velocity speed-up effect in hilly terrain[J]. Engineering Mechanics, 2010,27(7):32-37. (In Chinese)
- [6] 孙毅,李正良,黄汉杰,等. 山地风场平均及脉动风速特性试验研究[J]. 空气动力学学报,2011,29(5):593-599.  
SUN Yi, LI Zheng-liang, HUANG Han-jie, *et al.* Experimental research on mean and fluctuating wind velocity in hilly terrain wind field[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 29(5):593-599. (In Chinese)
- [7] 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 speed-up 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)
- [8] 李正良,徐妹亚,肖正直,等. 山地风速地形修正系数沿山坡的详细插值分布[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2016,43(3):23-31.  
LI Zheng-liang, XU Shu-ya, XIAO Zheng-zhi, *et al.* Detailed interpolation distribution of hilly wind topographic factor along hillside[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(3):23-31. (In Chinese)
- [9] BULLARD J E, WIGGS G F S, NASH D J. Experimental study of wind directional variability in the vicinity of a model valley[J]. Geomorphology, 2000,35:127-143.
- [10] 庞加斌. 沿海和山区强风特性的观测分析与风洞模拟研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2006:87-110.
- PANG Jia-bin. Field investigation and wind tunnel simulation of strong wind characteristics in costal and mountainous regions [D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2006:87-110. (In Chinese)
- [11] 陈政清,李春光,张志田,等. 山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性试验[J]. 实验流体力学,2008,22(3):54-59.  
CHEN Zheng-qing, LI Chun-guang, ZHANG Zhi-tian, *et al.* Model test study of wind field characteristics of long-span bridge site in mountainous valley terrain[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008,22(3):54-59. (In Chinese)
- [12] 李永乐,蔡宪棠,唐康,等. 深切峡谷桥址区风场空间分布特性的数值模拟研究[J]. 土木工程学报,2011,44(2):116-122.  
LI Yong-le, CAI Xian-tang, TANG Kang, *et al.* Study of spatial distribution feature of wind fields over bridge site with a deep-cutting gorge using numerical simulation[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(2):116-122. (In Chinese)
- [13] 陈平. 地形对山地丘陵风场影响的数值研究[D]. 杭州:浙江大学建筑工程学院,2007:47-68.  
CHEN Ping. Numerical study of terrain influence on the airflow over hilly land [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2007:47-68. (In Chinese)
- [14] 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:自然科学版,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)
- [15] 姚旦. 山丘地形风场特性及对输电塔的作用研究[D]. 杭州:浙江大学建筑工程学院,2014:41-42.  
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, 2014:41-42. (In Chinese)
- [16] RICHARDS P J, YOUNIS B A. Comments on "Prediction of wind-generated pressure distribution around buildings" by Mathews E H [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990,34(1):107-110.
- [17] 曾错. 计算风工程入口湍流条件改进与分离涡模拟[D]. 上海:同济大学航空航天与力学学院,2007:20-26.  
ZENG Kai. The improvement of inlet turbulence boundary condition in CWE and detached eddy simulation [D]. Shanghai: School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, 2007:20-26. (In Chinese)
- [18] AIJ. AIJ recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004:6-14-6-16.
- [19] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,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)