

山脉地形下击暴流风场数值模拟

汪之松^{1,2†}, 唐阳红¹, 方智远¹, 思建有¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:山区是下击暴流多发区域,为了研究下击暴流作用下连续山脉地形的风场特性,采用大涡模拟(LES)分析了山脉高度、间距等地貌因素对特征位置风场的影响.结果表明:山脉高度大于 50 m 时,山脚及山顶位置径向极值风速的大小随山脉高度增加而逐渐减小;山顶的加速效应主要受山高影响,其加速因子在近地面较大,而山脚的加速效应在上部空间较大;双山脉时,后山脉对前山脉湍流度的变化影响不明显,后山脉的湍流度呈现出随山脉间距扩大而先增大后减小、随前山脉高度增加而逐渐增大的变化规律.

关键词:下击暴流;连续山脉;加速效应;湍流度;数值模拟

中图分类号:TU312

文献标志码:A

Numerical Simulation of Downburst Wind Field under Continuous Mountains

WANG Zhisong^{1,2†}, TANG Yanghong¹, FANG Zhiyuan¹, SI Jianyou¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of China Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Mountainous areas are the regions where downburst often occurs. In order to study the wind field characteristics of continuous mountains under the downburst, the influence of height, distance and other geomorphic elements on the wind field of the characteristic position was analyzed by Large Eddy Simulation (LES). The results show that when the height of the mountain was greater than 50 m, the radial extreme wind speed at the foot of the mountain and the crest gradually reduced as the height of the mountain increased. The speed-up effect at the crest was significantly affected by mountain height, and the acceleration factor was larger near the ground, while the acceleration effect was larger in the upper space at the foot of mountain. For the two mountains, the rear mountain had less effect on the turbulence intensity of the front mountain, but the turbulence of the rear mountain ranges increased firstly and then decreased with the augment of the mountain distance and augmented gradually with the height increases of the front mountain.

Key words: downburst; continuous mountains; speed-up effect; turbulence intensity; numerical simulation

* 收稿日期:2018-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208537), National Natural Science Foundation of China(51208537)

作者简介:汪之松(1980—),男,安徽舒城人,重庆大学副教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: wangzhisong@cqu.edu.cn

下击暴流是雷暴强风产生形式之一,是一种由高空气流冲击地面并沿地面扩散形成的近地面短时强风的灾害现象.有学者研究发现,地形对近地面风场的影响很大,Homar 等^[1]对 1999 年西班牙发生的一次强对流天气进行分析,指出复杂的山地地形会极大地增强风暴的破坏性.山区为下击暴流的多发区域,2006 年至今,山东省^[2]、吉林省辽源市^[3]、重庆市垫江县及梁平县^[4]等多地都发生过下击暴流灾害现象,房屋、交通、电力基础设施等受损严重,死亡几十人.我国大部分地区都处于下击暴流影响的范围内,以山地丘陵居多的西南部地区,下击暴流发生的频率更高^[5],且输电塔等跨度、柔度大的结构在山区分布较多,受下击暴流等局部强风影响较大^[6],因而研究下击暴流作用下山脉地形的风场特性显得尤为重要.

目前针对山地地形风场特性的研究主要以大气边界层风场为主,而对下击暴流作用下的山地风场的研究多为二维风场或简化的斜坡地形. Takahashia 等^[7]通过风洞试验,研究了大气稳定性对山地地形边界层风场湍流度的影响;李正良等^[8-9]通过风洞试验及数值模拟的方法,研究了山体坡度、高度、形状等地貌因素对山体风场的影响;楼文娟等^[10]通过数值模拟的方法,分析了大气边界层风场下峡谷地形各位置的平均风速特性与加速效应,并给出了典型峡谷的风压地形修正系数;沈国辉等^[11]通过边界层风洞试验,对单个山体及两个山体前后和左右排列情况进行测试,给出了山体各位置处的风速剖面及加速效应变化规律;Letchford 和 Illidge^[12]对下击暴流作用下坡地及梯形山体附近的风场特性进行了研究,发现加速因子与坡度成正比;Wood 等^[13]通过冲击射流试验,研究了下击暴流在平面上的流动及简单地形特征中各位置的加速特性;Mason 等^[14]对各种类型的二维山地地形风场进行数值模拟分析,研究表明边界层风场加速效应比下击暴流风场加速效应大 35%左右;Mason 等^[15]利用数值模拟方法,分析了雷暴冲击风在不同地形上的风场特征及影响,发现最大加速效应可达 30%;汪之松等^[16]利用数值模拟方法,探讨了雷暴冲击风作用下单个余弦型山丘局部地形参数的变化对流场、风剖面及风速脉动特性等的影响.

学者们对单个山丘地形和堤坝地形的研究较多,而实际地形中存在较多的连续山体,所以本文以贴近实际地形的余弦形状作为横断面,通过改变山体高度及山脉间距等地貌因素,对下击暴流作用

下连续山脉地形的近地面风场进行分析,研究各项参数的改变对风剖面、风场加速效应、湍流度等的影响.

1 数值模拟概况

1.1 山体模型及工况

连续山脉横断面采用余弦型,其二维平面轮廓表达式及示意图如式(1)及图 1 所示.其中, Z 为高度方向; X 为水平方向; H 为山体高度; D 为山体底部直径; L 为两山脉山脚间距.

$$Z = \frac{H}{2} \left[\cos\left(\frac{\pi X}{D/2}\right) + 1 \right] \quad (1)$$

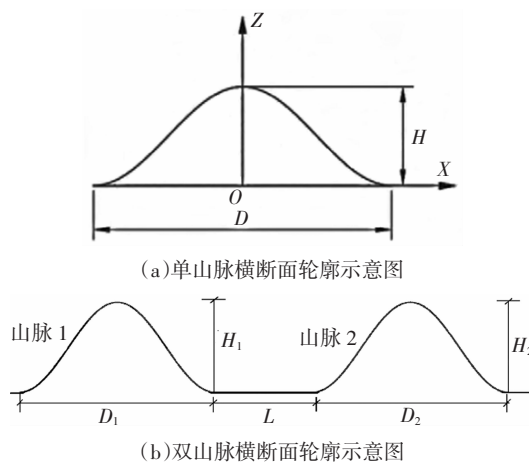


图 1 山脉横断面示意图

Fig.1 Schematic of continuous mountain's cross section

数值模拟工况如表 1 所示,主要考虑的参数有:山脉间距、山脉高度变化等.以 $H = 100 \text{ m}$, $L = 100 \text{ m}$, $D = 300 \text{ m}$ 作为本文中的典型山脉参数,其他参数的变化以此为基础.

表 1 数值模拟工况

Tab.1 Numerical simulation conditions			
序号	固定参数/m	变化参数/m	备注
1	$D=300; H=100$	无变化参数	单山脉
2~6	$D_1=D_2=300$ $H_2=100$	$H_1=50, 75, 100, 125,$ 150; $L=100$	考虑山脉 1 高度变化
7~12	$D_1=D_2=300$ $H_1=H_2=100$	$L=0, 1H, 2H, 3H,$ $4H, 5H$	考虑两山脉 山底间距

1.2 数值模型建立及网格划分

使用流体计算软件 Fluent 进行连续山脉地形的下击暴流风场模拟计算,采用大涡模型 (LES) 求解冲击射流瞬态流场.数值模型几何缩尺比为

1:1 000,时间缩尺比例 $1:1\ 000=[(D/V_{jet})]_{\text{present model}}/[(D/V_{jet})]_{\text{Equivalent model}}$ ($D=0.6\text{ m}$, $V_{jet}=20\text{ m/s}$)/ $[(D/V_{jet})]_{\text{Equivalent model}}$ ($D=600\text{ m}$, $V_{jet}=20\text{ m/s}$)^[17],时间步长为 0.001 s ,数值模型中的 1 s 相当于足尺生命周期中的 $1\ 000\text{ s}$.计算域的二维及三维示意图如图 2 所示,喷口直径 $D_{jet}=0.6\text{ m}$,计算域长为 $14D_{jet}$,宽 $6D_{jet}$,高 $3D_{jet}$,喷口与地面的距离 $H_{jet}=2D_{jet}$.在速度入口处,喷口出流速度为 20 m/s ,湍流强度 $I=1\%$;压力出口处湍流强度 $I=1\%$;壁面采用无滑移壁面,喷口上侧边界采用滑移壁面边界条件.

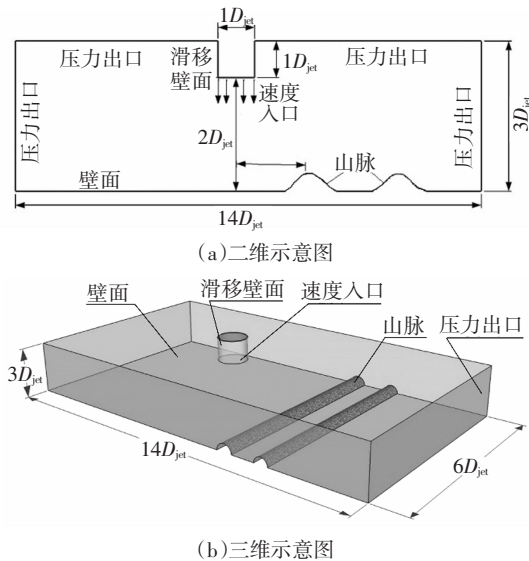


图 2 计算域示意图

Fig.2 Schematic diagram of the 3-d computation domain

由于近壁面区域的流动具有较低的雷诺数,湍流发展不充分,网格划分时对近壁面网格进行加密,使近壁面粘性底层区域满足无量纲距离 $y^+ < 5$.首层网格高度取 $5 \times 10^{-5}\text{ m}$,经计算得到 $y^+ \approx 3$.为验证网格的划分数量对下击暴流剖面影响的无关性,取3种网格数量进行比较,得到距下击暴流中心 $1.5D_{jet}$ 处竖向风剖面的对比结果,如图 3 所示.网格

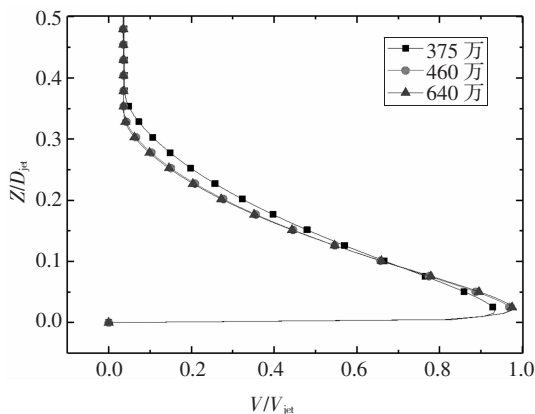


图 3 网格独立性研究 ($r=1.5D_{jet}$)

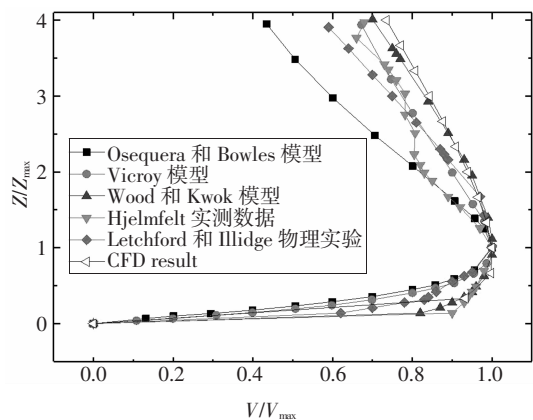
Fig.3 Study of mesh independence ($r=1.5D_{jet}$)

数为460万及640万所对应的数值模拟结果吻合较好,而375万网格对应的结果与二者相差较大,因此460万网格及以上已满足计算结果的需要,最终采用600万左右的单元网格数进行数值模拟.

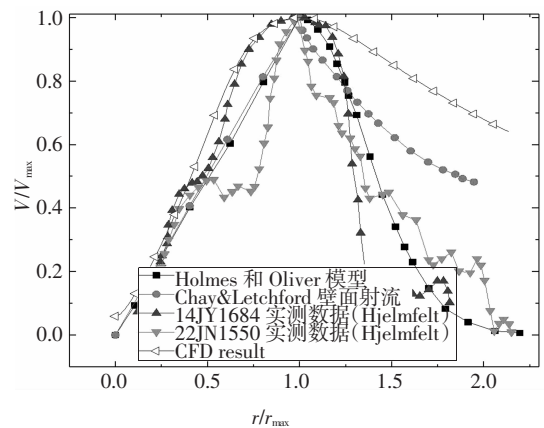
1.3 数值模拟精度对比

将CFD数值模拟结果与现有的经验模型和实测风剖面进行对比以验证本文计算的准确性.模拟结果选取 $r=1.5D_{jet}$ 处的竖向风剖面, $Z=0.08\text{ m}$ 处的径向风剖面,对比结果如图4所示.其中 Z_{max} 为竖向最大水平风速 V_{vmax} 对应的高度, r_{max} 为径向最大水平风速最大值 V_{rmax} 对应的径向距离.

从图4中可以看出,CFD数值模拟结果与Wood和Kwok模型竖向风剖面吻合较好,对应的径向风速剖面,在达到最大水平风速之前,与14JY1684实测数据^[18]吻合较好,在越过最大水平风速之后,衰减段的风速值较大,衰减较慢的主要原因是气流未充分发展或与实际地表粗糙度的差别,具体可参考文献[19].因而认为本文中的CFD数值模拟结果有较高的可靠度.



(a) 竖向风剖面比较 ($r=1.5D_{jet}$)



(b) 径向风剖面比较 ($Z=0.08\text{ m}$)

图 4 下击暴流的风剖面与大气边界层的风剖面的比较

Fig.4 Comparison wind profile of downburst and atmospheric boundary layer

2 数值模拟结果分析

2.1 数值模拟结果与试验对比

为验证数值模拟结果的准确性,除与典型模型风剖面进行对比外(如图 4),图 5 给出了平地工况大涡模拟与物理试验结果(喷口直径、离地高度,射流速度等与数值模拟相同)的对比.试验与数值模拟结果趋势相同,误差控制在 6%以内,数值模拟结果比较可靠,可利用该模型进行后期的计算.

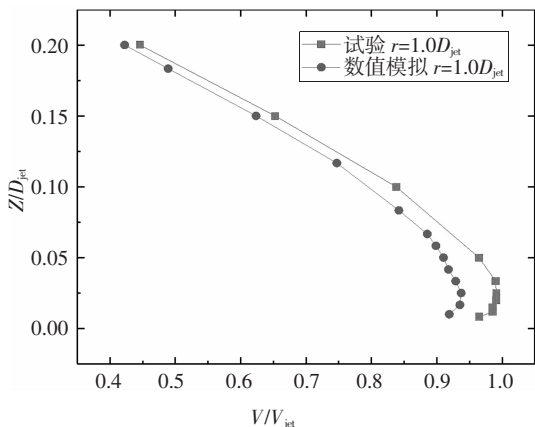


图 5 LES 模拟结果与试验结果对比

Fig.5 Comparison of radial velocity between LES and test

2.2 典型山脉风场变化过程

典型山脉地形特征时刻风场的速度云图,如图 6 所示.

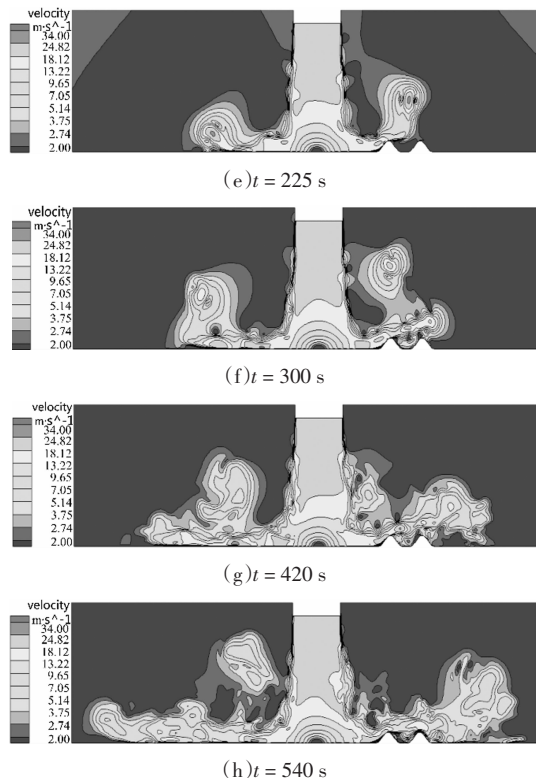
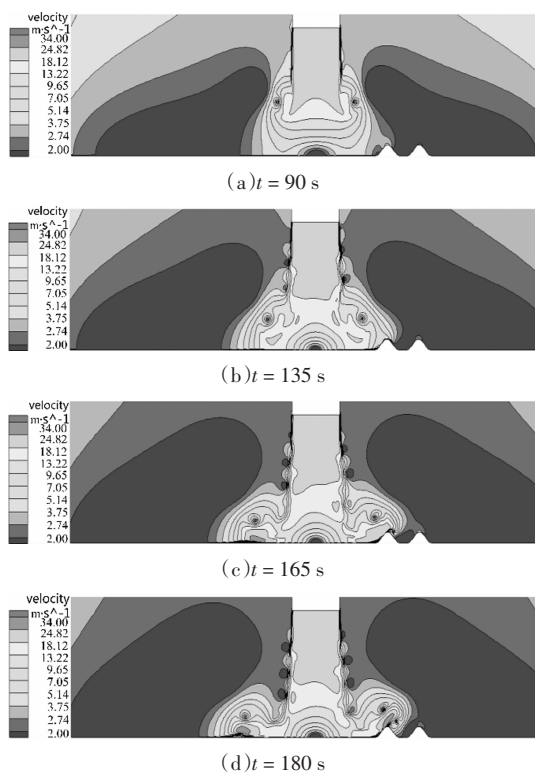


图 6 下击暴流形成、下沉、扩散过程的速度云图

Fig.6 The velocity contour and vector plot of downburst in different times

由图 6 可知,在下击暴流接触地面 ($t=90\text{ s}$)之前,由于云底形成的下沉气流与周围气体之间的拖曳卷吸作用,在气流前端形成了水平方向上的环形涡; $t=135\text{ s}$ 时,主涡尚未到达山前,风场几乎成对称分布; $t=165\text{ s}$ 时,下击暴流到达山脚,与左侧平地位置相比较,山脚主涡对应的速度有所下降,这是因为气流撞击山脉后分为两部分,一部分气流沿着山脉继续往上运动,另一部分则由于山脉的阻挡作用,出现反向回流涡旋,但影响范围较小; $t=180\text{ s}$ 时,环形涡处于山脉顶部位置且高度有所抬升,产生明显的加速效应; $t=225\text{ s}$ 时,涡旋继续向前发展,山顶环形涡出现明显的抬升现象,此时气流还未下沉; $t=300\text{ s}$ 时,气流分离扩散,山脉附近出现多个涡旋中心,下击暴流竖向影响范围扩大; $t=420\text{ s}$ 之后,下击暴流继续发展,并逐步趋于稳定,在 $t=540\text{ s}$ 时,下沉气流才完全将第二座山脉包裹,从图中可以看出,在气流的整个发展过程中,右侧地形影响范围内最大速度几乎都出现在第一座山脉山脚至山顶范围内.因此,在下文的分析中将着重关注山脉 1 加速度因子以及山脉 1、山脉 2 湍流度的变化规律.

2.3 风速特性与加速效应

2.3.1 风速剖面

为考虑山脉高度的变化对山脉不同位置处风速特性的影响,给出主涡第一次经过山脉 1 迎风面山脚(图 6(c), $t=165$ s)及山顶位置(图 6(d), $t=180$ s)时的径向风速剖面,并与平地工况相应位置进行对比,如图 7 所示。

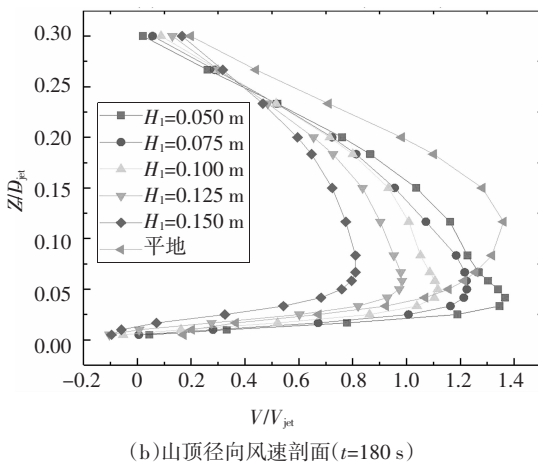
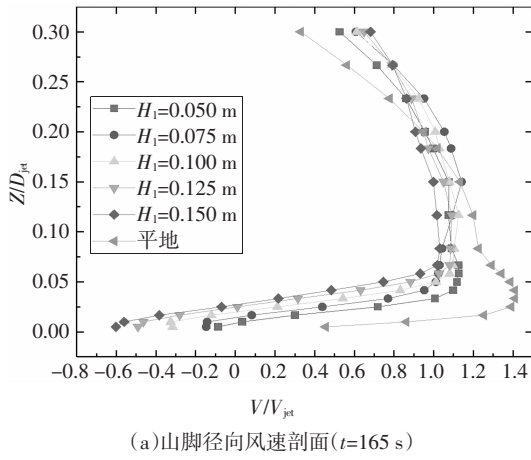


图 7 山脉 1 迎风面径向风速剖面

Fig.7 Radial velocity profile at the windward side of mountain one

由图 7 可知,迎风面山脚及山顶位置处的风速剖面均具有较为明显的变化规律:山脉高度越低,风速极值越大,但均小于平地工况下的风速极值;但山脚位置处的风速剖面随着高度的增加,其变化将越来越小.在山脚位置处,径向距离 $r_1=1.25D_{jet}$,山顶位置处,径向距离 $r_2=1.5D_{jet}$, $r_1=1.25D_{jet}$ 时,平地与坡地的极值风速高度大致相同,但平地地形对应风速极值明显大于坡地;而 $r_2=1.5D_{jet}$ 处,平地地形极值风速对应高度在 $0.125D_{jet}$ 左右,坡地工况对应高度明显降低,在 $Z=0.05D_{jet}$ 附近,坡高对极值风速高度的影响并不明显.但 $H_1=0.05$ m 时,极值风速大小

与平地几乎相同,这是因为平地时,高风速区与地面之间反向的次级涡旋对上部涡旋有一个抬升作用,且 0.05 m 的坡高较低,下击暴流气流过渡较为平稳,详见图 8。

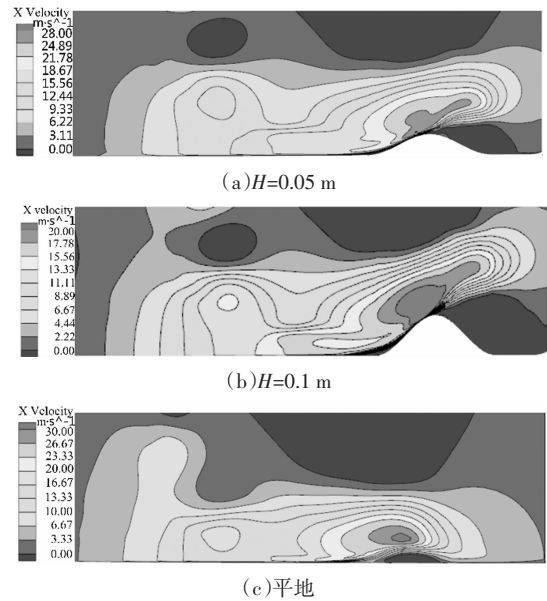


图 8 径向风速云图($t=180$ s)

Fig.8 The radial velocity contour of downburst

在贴近山体表面的位置处,坡脚及坡顶均存在负向风速,这是由于气流在撞击山体后,一部分气流产生负向回流涡旋,如图 9 所示,坡高越高坡度越大时,涡旋越大,负向风速越大,影响范围更广。

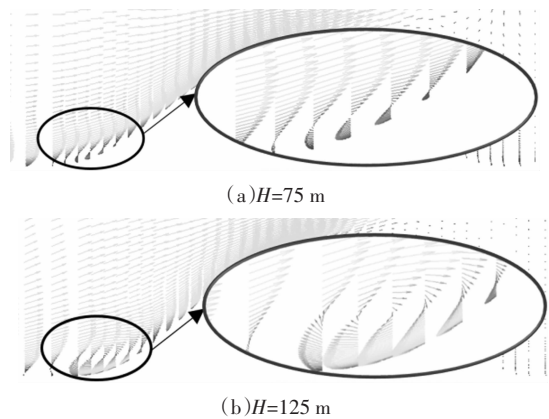


图 9 迎风面涡旋的变化规律

Fig.9 The trend of the vortex on the windward side

山脉 1 高度不同时,下沉气流初次冲击山脉 2 的时刻均不相同,因而山脉 2 的风速剖面取各工况 $Z=0.05D_{jet}$ (0.03 m) 高度处风速最大值对应时刻风剖面进行比较,如图 10 所示.从图 10 中可以看出,山脉 2 顶部风速极值的大小随山脉 1 高度的增大而逐渐减小,当 $Z>0.15D_{jet}$ 后,则呈相反的变化规律,

且山脉 1 高度越小,气流流动越平缓,山脉 2 顶部风速剖面的变化程度越小。

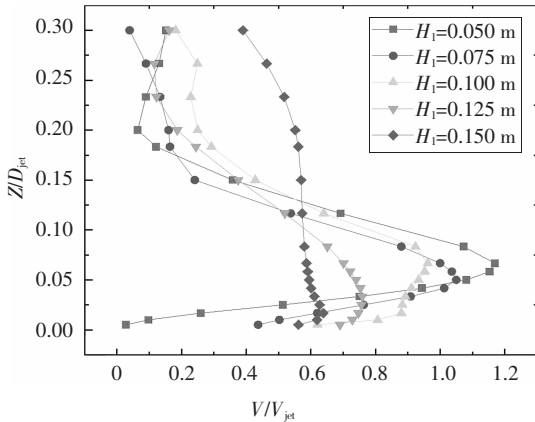


图 10 山脉 2 山顶径向风速剖面

Fig.10 Radial velocity profile at the crest of mountain two

2.3.2 风场加速效应

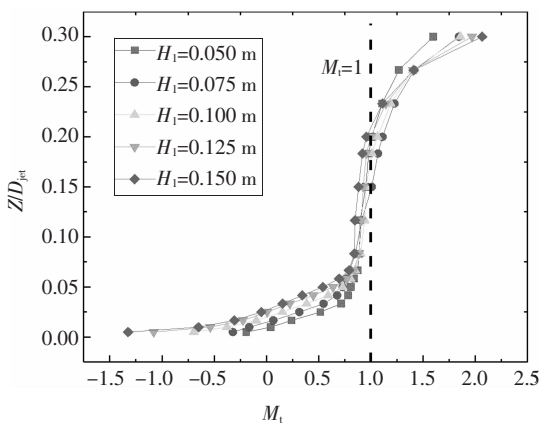
为定量研究地形对风场的影响,此处引入一个无量纲参数加速因子 M_t 作为参考,计算表达式如式(2)所示:

$$M_t = \frac{u(Z)_{topography}}{u(Z)_{flat}} \quad (2)$$

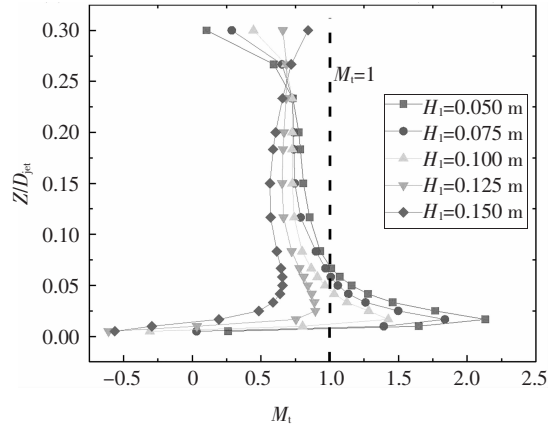
式中: $u(Z)_{topography}$ 表示山体地面以上 Z 高度处的风速; $u(Z)_{flat}$ 表示平地地面以上 Z 高度处的风速.对山脉 1 加速因子的分析如图 11 所示。

山脚及山顶位置近地面部分测点加速因子为负,且 $H_1 = 0.15$ m 时,坡脚位置加速因子绝对值达 1.4,这与 2.2.1 节中风速剖面出现负值的原因相同。

从图 11(a)中可以看出,坡脚位置由于主涡的抬升和底部负向涡旋的作用,离地高度小于 $0.2D_{jet}$ 时,加速因子几乎都小于 1,上部测点的加速因子反而更大.而坡顶位置处,近地面加速因子较大, $H_1 = 0.05$ m 时,加速因子最大值可达 2.15.随



(a)山脚径向风加速度因子变化规律($t=165$ s)



(b)山顶径向风加速度因子变化($t=180$ s)

图 11 山脉 1 迎风面径向风加速度因子变化规律

Fig.11 Radial wind acceleration factor at the windward side of the mountain one

着坡高的增大,加速度因子逐渐减小,当 H_1 大于 0.1 m 后,加速度因子均小于 1;离地高度大于 $0.2D_{jet}$ 后,加速度因子随着坡高的增大,有逐渐增大的趋势,这是因为坡高越大,主涡被抬升的高度越大,气流的影响范围被提高了。

2.4 湍流度变化规律

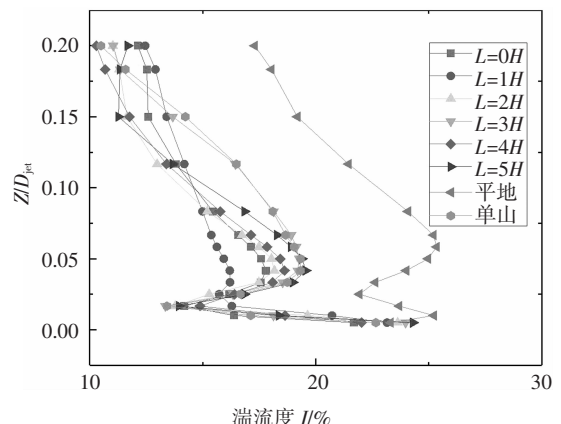
与大气边界层风场相似,下击暴流风场中产生的风速可表示为平均风速和脉动风速之和.近地面风场通常为湍流风场,通过湍流强度来反映风场中脉动成分的强弱,具体表达式如式(3)所示:

$$I(Z) = \frac{\sigma_v(Z)}{V_{jet}} \quad (3)$$

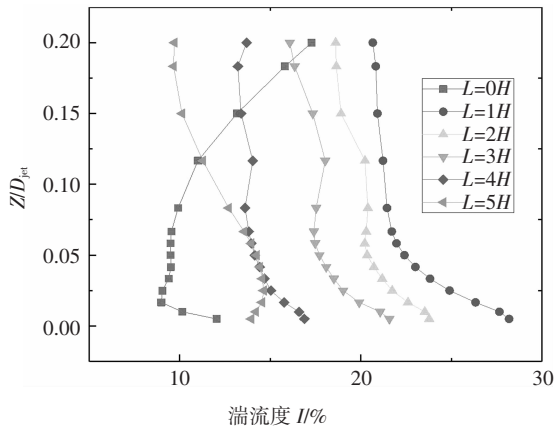
式中: $I(Z)$ 为高度 Z 处的湍流强度; $\sigma_v(Z)$ 为顺风向脉动风速均方根值; V_{jet} 为喷口射入风速。

2.4.1 山间距对湍流度的影响

对工况 7~12 进行分析,并与工况 1 单山脉情况进行对比,具体湍流变化规律如图 12 所示。



(a)山脉 1 顶部



(b)山脉2顶部

图12 山间距变化对湍流度的影响

Fig.12 Influence of mountain spacing on turbulence

山脉1顶部湍流度变化规律如图12(a)所示,当高度 $Z < 0.02D_{jet}$ 时,各工况下湍流度均随高度的增加逐渐减小;当 $0.04D_{jet} > Z > 0.02D_{jet}$ 时,湍流度逐渐增大;当 $Z > 0.04D_{jet}$ 后,随着高度的增加湍流度又逐渐减小,两山脉间距的大小对山脉1顶部的湍流度,特别是近地面无明显的影响.单山脉山顶湍流度的变化规律与 $L=3H$ 工况时的变化规律几近相同,但各工况下湍流度大小的变化并无明显区别,增减量也几近相同.

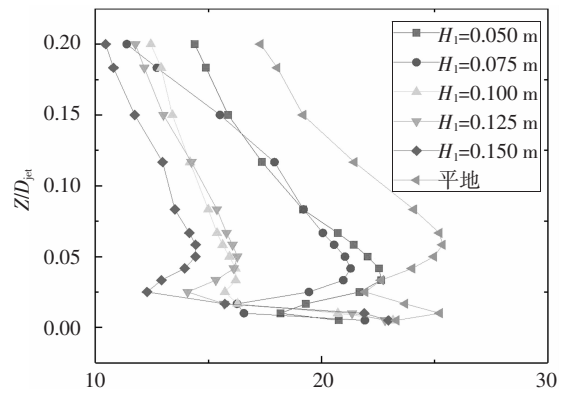
随着两山脉间距的增大,山脉2顶部湍流度呈现出先急剧增大,后逐渐减小的趋势.当两山脉间距 $L=0H$ 时,湍流度变化较小,近地面湍流度最大值为0.125,此时,气流越过山脉1后,直接流向山脉2顶部,两山脉之间下沉的气流较少,山脉2顶部近地面气流较为平稳;当 $L=1H$ 时,湍流度迅速增大,最大值接近0.3;当间距继续增大时,湍流度逐步减小.出现该现象的原因是,两山脉间距越大,气流向前的扩散和向山脉间的下沉作用之间的影响就越小,气流发展越平稳,湍流度的变化将会越小.

2.4.2 山脉高度对湍流度的影响

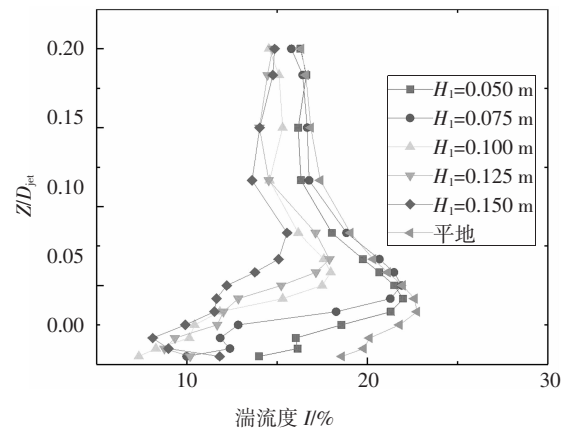
本节主要考虑山脉1高度变化对山脉1及山脉2各特征位置处湍流度的影响,如图13所示.

对于山脉1顶部, $Z < 0.025D_{jet}$ 时,湍流度随高度的增加而逐渐减小; $Z > 0.025D_{jet}$ 时,随着高度的增加,湍流度先逐渐增大后减小,山脉1越高,顶部湍流度越小,变化趋势与图12(a)相同,特征位置处湍流度均小于平地对应位置.山脉1迎风面山脚位置,

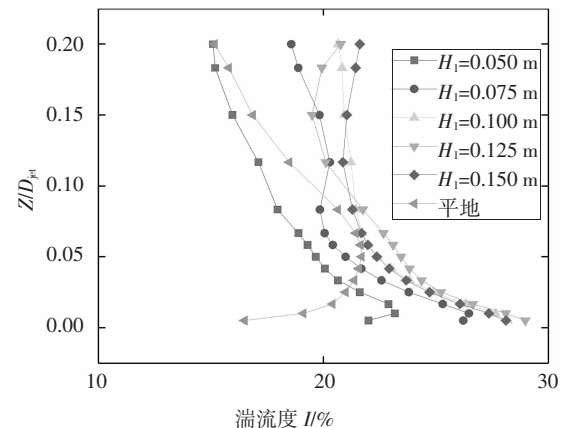
由于回流涡旋及山脉高度的影响,涡旋影响范围内,山脉越高反向风速越大,湍流度越小,与平均风速剖面(如图14所示)发展趋势基本一致.



(a)山脉1顶部



(b)山脉1迎风面底部



(c)山脉2顶部

图13 山脉1高度变化对湍流度的影响

Fig.13 Influence of height change of mountain one on turbulence

山脉2顶部湍流度随着竖向高度的增加,呈现出逐渐减小的趋势,且坡高越大,近地面湍流度越

大.当 $H_1 = 50$ m 时,坡度过渡平缓,故山脉 2 顶部湍流速度变化整体较小,当山脉 1 高度超过 75 m 后,山脉 2 顶部湍流速度范围在 0.2~0.3 之间,整体变化幅度不大.

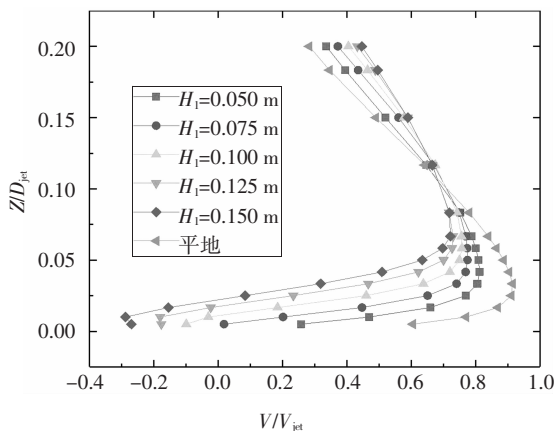


图 14 山脉 1 迎风面底部径向平均风速剖面

Fig.14 Radial mean wind velocity profile

由 2.4 节可知,以喷口射入风速作为分母计算湍流度,其变化范围基本在 0.1~0.3 之间,离地高大于 100 m 时,湍流度仍大于 0.1,出现大量低风速高湍流度的情况,在结构设计时,应综合考虑该因素的影响.

3 结论

本文以连续山脉地形为研究对象,详细分析了山脉高度变化及山脉间距等地貌因素对风场的影响,具体体现在风速剖面、加速度因子及湍流度的变化上,主要结论如下:

1)典型双山脉地形中,气流发展稳定后,地形影响范围内,风速极值大都发生在山脉 1 迎风面.主涡第一次经过山脉 1 脚部及顶部时产生的风速剖面呈现出随高度的增大逐渐减小的趋势;山脉 2 顶部风速极值随山脉 1 高度的增加而逐渐减小,但山脉 1 高度越高,山脉 2 上部风速也相对更大.

2)山脉顶部的加速效应主要受山高的影响,其加速因子在近地面较大,而山脚加速效应在上部较大,山脉高度大于 125 m 后,近地面加速因子均小于 1.

3)两山脉间距的改变对山脉 1 顶部湍流度的变化无明显影响,因而单山脉时湍流度的变化规律

与双山脉相同,山脉 2 顶部湍流度随间距的增大呈现出先增大后减小的趋势,且湍流度较大;改变山脉 1 高度的情况下,其迎风面山脚近地面湍流度随山脉高度的增加,涡旋影响越大,其湍流度小.

4)在山脉 1 迎风面底部、顶部等位置,瞬时加速度因子大,出现了较大风速 ($V > 15$ m/s)、高湍流度 ($I > 20\%$) 的情况,易对高耸结构造成较大的风振效应.在山区地形中,针对输电塔等高耸结构选址、结构设计时,除了考虑下击暴流等极端天气作用下的风速极值,还应针对不同位置,综合考虑风场的加速效应及高湍流度的影响.

参考文献

- [1] HOMAR V, GAYA M, ROMERO R, *et al.* Tornadoes over complex terrain: an analysis of the 28th August 1999 tornadic event in eastern Spain [J]. *Atmospheric Research*, 2003, 67(1):301—317.
- [2] 刁秀广, 赵振东, 高慧君, 等. 三次下击暴流雷达回波特征分析 [J]. *气象*, 2011, 37(5):522—531.
DIAO X G, ZHAO Z D, GAO H J, *et al.* Doppler radar echo features of three downburst [J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(5):522—531. (In Chinese)
- [3] 侯雪松, 关志宇, 王新国. 辽源市东辽县境内一次下击暴流的分析 [J]. *吉林气象*, 2009(4):27—29.
HOU X S, GUAN Z Y, WANG X G. Analysis of a single downburst in Dongliao County, Liaoyuan City [J]. *Jilin Qixiang*, 2009(4):27—29. (In Chinese)
- [4] 任思衡, 秦牧原, 王春明, 等. 重庆“5·6”强对流过程诊断分析 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(15):9093—9098, 9108.
REN S H, QIN M Y, WANG C M, *et al.* The diagnosis analysis of “5·6” strong convection in Chongqing [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(15):9093—9098, 9108. (In Chinese)
- [5] 李宏海, 欧进萍. 我国下击暴流的时空分布特性 [J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(6):9—18.
LI H H, OU J P. Spatiotemporal distribution characteristics of downburst in China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(6):9—18. (In Chinese)
- [6] 牛华伟, 洪飞, 欧阳克俭, 等. 拉线门塔在下击暴流作用下的响应分析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3):72—81.
NIU H W, HONG F, OUYANG K J, *et al.* Analysis on downburst induced response of guyed portal tower [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(3):72—81. (In Chinese)
- [7] TAKAHASHI T, KATO S, MURAKAMI S, *et al.* Wind tunnel tests of effects of atmospheric stability on turbulent flow over a three-dimensional hill [J]. *Journal of Wind Engineering and*

- Industrial Aerodynamics, 2005, 93(2):155—169.
- [8] 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 Z L, SUN Y, WEI Q K, *et al.* Numerical simulation of mean velocity speed-up effect in hilly terrain [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7):32—37. (In Chinese)
- [9] 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 Y, LI Z L, HUANG H J, *et al.* Experimental research on mean and fluctuating wind velocity in hilly terrain wind field [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(5):593—599. (In Chinese)
- [10] 楼文娟,刘萌萌,李正昊,等. 峡谷地形平均风速特性与加速效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7):8—15.
LOU W J, LIU M M, LI Z H, *et al.* Research on mean wind speed characteristics and speed-up effect in canyon terrain[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 8—15. (In Chinese)
- [11] 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.
SHEN G H, YAO D, YU S C, *et al.* Wind tunnel test of wind field characteristics on isolated hill and two adjacent hills [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(5):805—812. (In Chinese)
- [12] LETCHFORD C, ILLIDGE G C. Turbulence and topographic effects in simulated thunderstorm downdrafts by wind tunnel jet[C] //Proceedings of the Tenth International Conference on Wind Engineering. Denmark, 1999:1907—1912.
- [13] WOOD G S, KWOK K C S, MOTTERAM N A, *et al.* Physical and numerical modelling of thunderstorm downbursts [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(6): 535—552.
- [14] MASON M S, WOOD G S, FLETCHER D F. Impinging jet simulation of stationary downburst flow over topography [J]. Wind and Structures, 2007, 10(5):437—462.
- [15] MASON M S, WOOD G S, FLETCHER D F. Numerical investigation of the influence of topography on simulated downburst wind fields [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(1):21—33.
- [16] 汪之松,刘亚南,邹鑫,等. 考虑山体地形影响的冲击射流风场特性研究 [C]//第十七届全国结构风工程学术会议论文集. 北京, 2015:103—104.
WANG Z S, LIU Y N, ZOU X, *et al.* Study on the characteristics of impinging jet flow field considering the influence of mountain Topography [C]// The Seventeenth National Conference on Structural Wind Engineering. Beijing, 2015: 103—104. (In Chinese)
- [17] ABD-ELAAL E S, MILLS J E, MA X. Empirical models for predicting unsteady-state downburst wind speeds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 129:49—63.
- [18] HJELMFELT M R. Structure and life cycle of microburst outflows observed in colorado[J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 27(8):900—927.
- [19] 李朝,肖仪清,李秋胜,等. 静止型壁面射流的CFD模拟及在下击暴流中的应用[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集. 北京, 2009:137—142.
LI C, XIAO Y Q, LI Q S, *et al.* The CFD simulation of static wall jet and application on downburst [C]// The Fourteenth National Conference on Structural Wind Engineering. Beijing, 2009:137—142. (In Chinese)