

不同坡度单体山丘风速地形修正系数与越山风效应风洞试验研究

牛华伟^{1†}, 陈伟昆¹, 赵永胜², 陈政清¹

(1. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;
2. 中国电力工程顾问集团 中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要:为了研究不同坡度单体山丘风速地形修正系数与越山风效应对输电塔线结构的影响, 对比了国内外5种规范取值与风洞试验测试结果, 分析了不同坡度山丘山顶位置和迎、背、侧风坡面风速地形修正系数, 并探讨了山丘风场竖向风速分量与紊流度变化特性。研究表明:5种规范中我国建筑结构荷载规范与高耸结构设计规范对不同坡度山丘山顶处的风速地形修正系数的取值最大;山顶位置风速地形修正系数并非完全随坡度增大而增加, 坡度大于0.577之后达到1时, 风速地形修正系数反而减小;现有的拟合公式计算山丘表面区域的侧风坡风速修正系数取值偏小, 而计算上部区域的风速修正系数取值却明显偏大;山体坡度越大则竖向风速分量极大值反而越小, 三类坡度山丘在迎风坡和背风坡测试的最大竖向风速分量与参考来流风速的比值分别为0.523和-0.542;山体坡度越大则表面紊流度越大, 特别是陡峭山坡背风侧紊流度比较大, 坡度为1时山丘背风侧0.6倍山体高度处的紊流度可高达35%。

关键词:风速地形修正系数;风洞试验;山丘;竖向风速分量;紊流度

中国分类号:TU973.32

文献标志码:A

Study on Topographic Factor of Single Hill with Different Slope and Effect of Wind Flow over Hill by Wind Tunnel Test

NIU Huawei^{1†}, CHEN Weikun¹, ZHAO Yongsheng², CHEN Zhengqing¹

(1. Key Laboratory of Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Central Southern China Electric Power Design Institute Co Ltd, China Power Engineering Consulting Group Co Ltd, Wuhan 430071, China)

Abstract:In order to investigate the topographic factor of single hill with different slopes and the influence of wind flow over hill on transmission tower-line system, wind tunnel tests of three hill models with different slope were carried out and the results were compared with several different codes in China and abroad. The topographic factor at hilltop and along the hillside were analyzed, together with the vertical wind component and turbulence of wind field. The results show that the topographic factors at hilltop for different slopes are the largest in the Load code for the design of building structures and Code for design of high-rising structures. The topographic factor at hilltop does not always increase with the increasing slope of the hill, and it gradually decreases when the slope increases from 0.577 to 1. Additionally, The topographic factors of cross-wind at the surface of the hill calculated by the existing fitting for-

* 收稿日期:2017-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478181, U1534206), National Natural Science Foundation of China(51478181, U1534206)

作者简介:牛华伟(1978—),男,河南驻马店人,湖南大学高级工程师,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: niuhw@hnu.edu.cn

mula are smaller than the measured ones, while the calculated values in the upper area are larger than the test one. Moreover, the maximum value of the vertical wind speed component decreases as the slope of the hill increases, and the ratios between the maximum vertical wind speed component and the inflow velocity are 0.523 and -0.542 for the windward and leeward side of the three types of slopes, respectively. The turbulence at the surface increases with the increasing slope of the hill, which is most obvious at the leeward side of steep hill. For example, when the slope is 1, the turbulence at the leeward side of the hill reaches to 35% at the 0.6 times height of the hill.

Key words: topographic factor; wind tunnel test; hill; vertical wind component; turbulence

对长距离输电线路工程设计而言,山丘是最常面对的自然地形之一.自然风流经山丘地形会形成复杂的风场分布,所以在房屋建筑或输电线路设计中必须考虑地形效应的影响.为此,国内外研究人员通过风洞试验、CFD数值模拟及现场实测等手段来研究山丘地形的风速分布规律^[1]. Jackson等采用理论和数值计算,并结合风洞试验测试提出了适用于二维光滑低矮小山的加速效应解析算法^[2]; Kobayashi等针对二维山丘有无植被覆盖的情况,采用边界层风洞试验和CFD数值模拟进行了对比研究,发现有植被覆盖的情况下CFD得到的山丘风剖面与风洞试验结果偏差较大^[3]; Ishihara等采用风洞试验模拟研究三维山丘在山顶、山腰和山脚处的风速分布,并与Mason等人的相关研究比较,发现迎风坡脚附近的风速有所减小,但在山顶、山腰点,风速有明显增大,山顶风速增加50%~60%^[4]; Weng等针对山丘几何尺寸和表面粗糙度等因素进行边界层数值模拟^[5]; 杨靖波等采用风洞试验方法研究二维山丘不同高度、不同坡度及分布位置处的风速地形修正系数,并与建筑结构荷载规范进行了对比,发现多数情况下风速地形修正系数未超越规范取值,但缓坡山丘山顶处50 m高度以下有超越规范取值情况^[6]; 李正良等对一系列山体进行了风洞试验和CFD模拟,其中,拟合了适用于高度90~500 m且坡度0.13~0.5山丘的风速地形修正系数的计算公式^[7],但是计算公式是否满足坡度0.5以上的山丘风场的风速地形修正系数仍有待验证; 沈国辉等采用CFD模拟方法研究单山丘和双山丘情况下的三维山丘风场,发现山顶上方半山高度的加速效应减弱及山体横风向切面的加速效应大于顺风向切面^[8].

前述研究主要关注山丘地形的顺风向风速分布特性,研究的地形坡度一般 ≤ 0.5 ,而大坡度山丘在实际工程设计中也很常见,该类山丘不但顺风向风速放大系数重要,其背风侧竖向气流分量和紊流

特性也会对结构动力荷载产生明显影响. Bowen等针对4种不同坡度的单体二维斜坡进行了风洞试验测试,发现紊流特性在山体后侧区域发生显著变化^[9]; Cao等利用风洞试验对二维陡峭山体前方及山体表面是否设置粗糙块情况下的紊流强度进行比较,发现粗糙块的存在使山顶紊流强度增加^[10]. 陈政清、庞加斌等学者通过现场实测等手段研究了复杂自然地形的风速特性与紊流度特性,发现紊流度由于山区地形影响变化很大^[11-12]. 此外, Momomura等对位于某山地中的输电塔进行了为期2年的实测,发现山区地形对于风速和紊流度垂直分量影响很大^[13]; Okamura等则通过风洞试验流场显示技术对二维山体周围风场进行了研究,发现山体背风侧的气流存在向下的分量,这对输电塔的影响有着较大的影响^[14]. 可见,山丘地形特别是大坡度山丘的背风侧紊流特性分布及风场竖向分量的研究还非常缺乏,这已成为电力工程设计中亟待解决的重要课题.

同时,作者经过比较研究发现,各国规范条文^[15-19]针对山丘地形给出的风速地形修正系数取值差别很大,这与李正良等对各国规范中山丘加速效应的比较研究结果一致^[20-25],这种差异需要通过物理模型试验仔细研究,以便确定我国建筑荷载规范中风速地形修正系数的合理取值.

鉴于前述研究中存在的不足,本文将通过风洞试验测试不同坡度三维山丘地形的风速与紊流度分布,研究山丘地形不同位置处的风速地形修正系数、风场竖向风速分量和紊流度分布规律,并比较分析测试的山丘地形风速修正系数与各国规范取值的差异.

1 风速地形修正系数的规范取值

为了研究合理的风速地形修正系数取值,首先列举了国内外5种常用规范的风速地形修正系数

取值方法,如表 1 所示.其中,我国规范均采用风压修正系数,而国外 3 种规范均采用风速地形修正系数,两者之间可以通过式(1)转换:

$$\eta_{V_z} = \sqrt{\eta_{P_z}} \quad (1)$$

可见,上述规范条文对于坡度小于 0.45 的山丘规定比较详细,而在山体坡度大于 0.45 时风速地形修正系数取值相同,条文规定明显有所欠缺.同时,不同规范针对同一坡度山丘计算所得的风速地形

表 1 5 种规范风速地形修正系数取值方法比较

Tab.1 Coefficient correction of topographic in five kinds of codes

规范名称	风压/风速地形修正系数公式	系数说明	几何参数说明
中国建筑结构荷载规范 ^[15]	$\eta_{P_z} = \left[1 + k \tan \alpha \left(1 - \frac{z}{2.5H} \right) \right]^2$	k 为系数,对山峰取 2.2;当 $\tan \alpha$ 大于 0.3 时,取 0.3	
中国高耸结构设计规范 ^[16]	数据表格(略)	根据规范线性插值;当 $\tan \alpha$ 大于 0.33 时,取 0.33	
美国 ASCE/SEI 7-10 ^[17]	$\eta_{V_z} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2$ $K_2 = 1 - \frac{ x }{\mu L_h}$ $K_3 = e^{-\gamma z/L_h}$	K_1 为考虑地形所引起的风速增大效应的增速因子; K_2 为考虑上或下风向离脊顶距离的换算因子; K_3 为考虑地形高度的换算因子; μ 为水平衰减系数; γ 为高度衰减系数;当 $H/L_h > 0.5$ 时, $H = 2L_h$	$\tan \alpha$ 为山峰在迎风面一侧的坡度; z 为建筑物计算位置离局部地面的高度; L_h 为山高一半时山丘中轴线到山丘地表的水平距离; L 为迎风或背风坡水平长度; H 为山丘全高; x 为建筑物计算位置距离山脊的水平距离
欧洲 EN 1991-1-4 ^[18]	$\eta_{V_z} = \begin{cases} 1 & \tan \alpha < 0.05 \\ 1 + 2s \tan \alpha & 0.05 \leq \tan \alpha \leq 0.3 \\ 1 + 0.6s & \tan \alpha > 0.3 \end{cases}$ $s = A e^{(B \frac{x}{L})}$	s 为地形位置系数; A 、 B 为多项式,根据不同地形和位置选取不同公式;当坡度大于 0.3 时,取 0.3 计算	
澳大利亚/新西兰 AS/NZS 1170.2:2002 ^[19]	$H/(2L_h) < 0.05 : \eta_{V_z} = 1$ $0.05 \leq H/(2L_h) < 0.45$ 或 > 0.45 ; $\eta_{V_z} = 1 + (H/3.5(z + L_1))(1 - x /L_2)$ $H/(2L_h) > 0.45$ 分流区; $\eta_{V_z} = 1 + 0.71(1 - x /L_2)$	L_1 为 η_{V_z} 沿高度变化的参数; L_2 为 η_{V_z} 沿水平变化的参数; 坡度适用范围如公式所示	

修正系数差别很大,具体偏差将结合风洞试验测试结果在下文进行分析.

通过比较可知,5 种规范中我国建筑结构荷载规范与高耸结构设计规范对不同坡度山丘山顶处的风速地形修正系数的取值最大,欧洲规范取值最小;仅美国规范考虑了三维轴对称地形情况,通过 $k_1/(H/L_h)$ 、 μ 和 γ 的取值来区分二、三维山丘地形.

2 风洞试验模型与风场参数

模型制作中,山丘地表母线采用如下余弦曲线:

$$\begin{cases} H \cos^2(\pi r/2L) & \text{for } |r| < L \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: H 为山体高度; L 为迎风或背风坡水平长度; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$;山体坡度 $\tan \alpha = H/L$.由此得到的概化山丘三维轴对称模型如图 1 所示,其中以模型底盘圆心为坐标轴零点位置,为了方便图示,图 1 模

型适当抬高.下文测试中来流均沿图中 x 轴正方向.

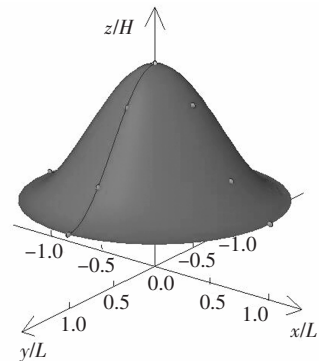


图 1 参数化的三维山丘模型

Fig.1 Parameter model of three dimensional hills

考虑背景工程项目的需要,研究中选取了 3 种不同坡度的山丘,原型高度为 100 m,坡度分别为 0.176、0.577 和 1,拟定的模型缩尺比为 1/500,依之确定的模型参数见表 2.

表2 三维概化山丘模型尺寸参数
Tab.2 Size parameters of Generalized hills model

模型编号	模型缩尺比	模型高度/cm	坡角/(°)	坡度	模型直径/m
SQ-1	1/500	20	10	0.176	2.269
SQ-2	1/500	20	30	0.577	0.693
SQ-3	1/500	20	45	1	0.4

3种模型均采用高密度泡沫和木质板材制作,外形曲线由数控雕刻机精密加工保证,在其顶面覆盖约1mm厚的石膏层和真石漆,模拟实际山体随机分布的粗糙表面。

风洞试验在湖南大学 HD-2 边界层风洞第一试验段进行,截面尺寸为3m(宽)×2.5m(高),试验段长度17m,保证了模型试验的阻塞比不大于5%。风洞试验时采用《建筑结构荷载规范》^[15]中的B类风场,按照1/500的比例通过“尖劈+粗糙元”方法模拟,实测风速和紊流度剖面曲线如图2所示。风场测试采用澳大利亚TFI眼镜蛇探针及电动控制移测架系统共同实现。考虑到山丘模型高度为0.2m,山顶处的测试高度范围在0.4m以内,因此对风洞近地面流场的风速分布剖面要求严格,风场测试范围主要控制了0~0.4m高度范围内的模拟精度。

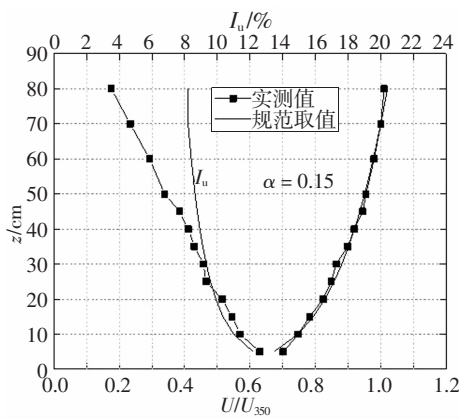


图2 风场平均风速剖面和紊流度剖面
Fig.2 Wind speed profile and turbulence of wind field

3 顺风向风速地形修正系数比较

3.1 山顶处风速地形修正系数

参考表1中不同规范的条文,山体坡度大于0.5时风速地形修正系数曲线取值均相同,因此将风洞试验测试得到的3种坡度山丘的数据按照坡度分为两个图形比较,其山顶处的风速地形修正系数沿高度的变化情况如图3和图4所示。图中同时列出了不同规范取值的系数曲线,其中, $\eta_{hz} = z/H$ 为

无量纲高度, $\eta_{Vz} = V_{Tz}/V_{Cz}$ 为风速地形修正系数; H 为山体高度; z 为测点离山体表面的距离; V_{Tz} 为 z 高度处的实测平均风速值; V_{Cz} 为 z 高度处的来流参考平均风速值。

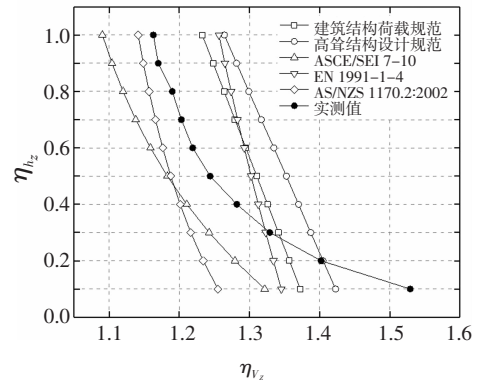


图3 坡度0.176的山丘山顶位置风速地形修正系数曲线
Fig.3 The topography correction curves at hilltop of 3D hill with a slope of 0.176

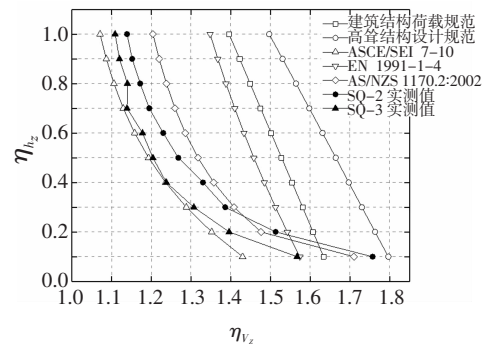


图4 坡度0.577和1的山丘山顶位置风速地形修正系数曲线
Fig.4 The topography correction curves at hilltop of 3D hill with a slope of 0.577 and 1

比较分析可知:

1) 实测山顶位置风速地形修正系数并非完全随坡度增大而增加,坡度大于0.577之后达到1时,风速地形修正系数反而减小。

2) 坡度0.176的山丘风速地形修正系数与中国建筑结构荷载规范建议值较为接近,且靠近山体表面时比规范值更大,上部 $\eta_{hz} > 0.3$ 时比规范值更小,最大偏差为 $\eta_{hz} = 0.1$ 位置的11.41%;坡度0.577和1的山丘风速地形修正系数整体上与美国规范建议值偏差较小,实测系数上部略大于美国规范取值且显著小于中国规范取值,下部无量纲高度为0.1处最大偏差分别为+22.88%和+9.59%,此时实测系数反而与中国规范更加接近。

3.2 不同位置风速地形修正系数的变化情况

测试得到的3种坡度模型在对应实际山体表

面以上高度 10 m、30 m、50 m 和 100 m 时,不同位置的风速地形修正系数及其与中国建筑结构荷载规范和美国规范取值比较如图 5~图 7 所示,其中侧风

坡坡面数据与文献[7]中李正良等拟合的插值公式计算值进行对比,图中 $x/L < 0$ 为迎风坡面, $x/L > 0$ 为背风坡面, $y/L > 0$ 为侧风坡面.比较分析可知:

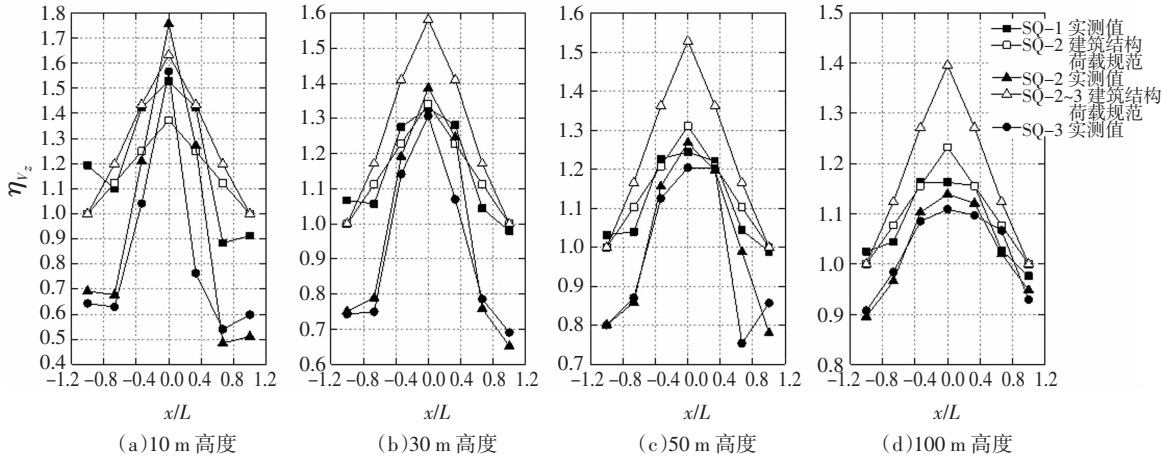


图 5 不同坡度山丘迎、背风坡面风速地形修正系数与中国建筑结构荷载规范的对比
Fig.5 Comparison between Chinese GB 50009-2012 code value and calculate result of topography factor of the upslope and the downslope for different grade

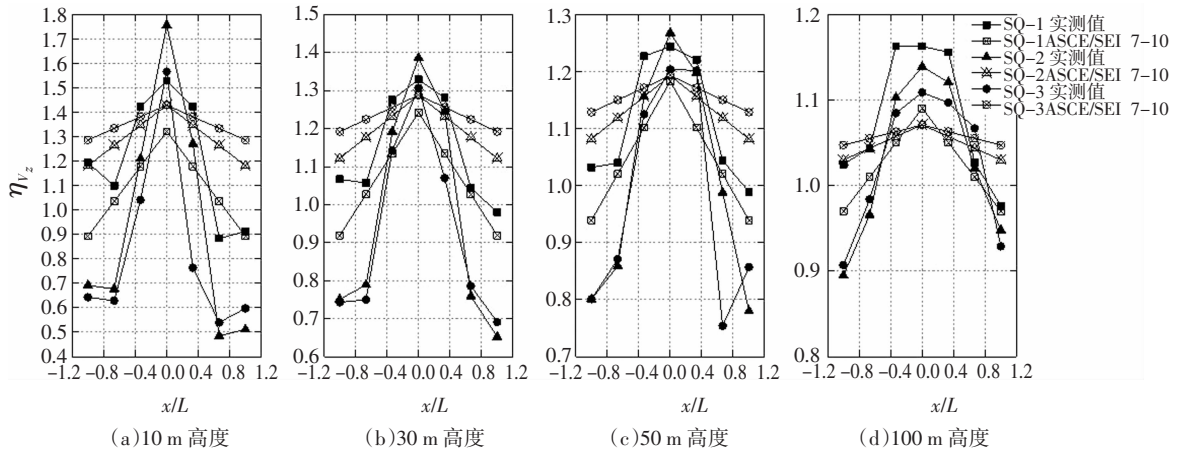


图 6 不同坡度山丘迎、背风坡面风速地形修正系数与美国规范的对比
Fig.6 Comparison between American code value and calculate result of topography factor of the upslope and the downslope for different grade

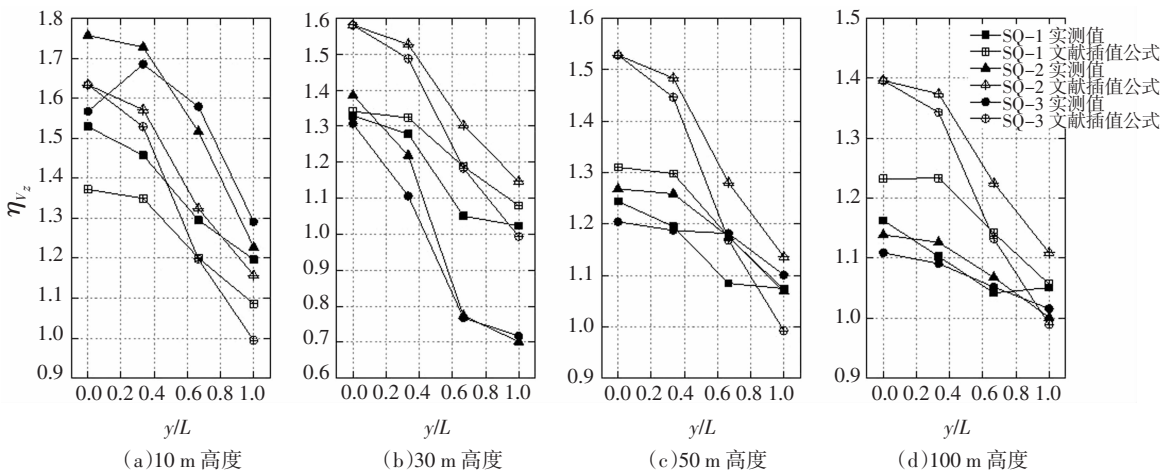


图 7 不同坡度山丘侧风坡面同一高度风速地形修正系数与文献公式值的对比
Fig.7 Comparison between value from literature and calculate result of topography factor of the slope on side for different grade

1)坡度 0.176 山丘的实测值整体与中国建筑结构荷载规范值较为接近,10 m、30 m、50 m 和 100 m 偏差最大分别为-21.30%、+6.70%、-5.68%、-5.66%;坡度 0.577 和 1 的山丘在 10 m 和 30 m 高度实测值与中国建筑结构荷载规范值较为接近,在 50 m 和 100 m 高度与美国规范值较为接近,但整体上比中国规范取值更小。

2)文献[7]插值公式基于中国建筑结构荷载规范,所以 3 个模型侧风坡面 10 m 高度位置的风速地形修正系数基本都超出公式值,偏差最大分别为+11.42%、+14.52%和+31.84%;坡度 0.176 和 0.577 的山丘风速地形修正系数其他位置均满足要求,而坡度为 1 的山丘 10 m、30 m、50 m、100 m 高度均有部分超出公式值,最大偏差分别达到+31.84%、-18.71%、-21.20%和-20.13%。

4 竖向风速分量与紊流变化特性

4.1 竖向风速分量

测试得到的 3 种坡度山丘 10 m、30 m、50 m 和

100 m 高度处迎、背风坡面的竖向风速分量与同一高度来流参考风速值的比值沿位置变化情况如图 8 所示,其中负值表示方向向下.比较分析可知:

1)离山体表面距离越小则竖向风速分量越大,且迎风坡竖向分量为正值,而背风面竖向分量为负值,10 m 高度和 30 m 高度的迎风面竖向风速分量无量纲系数分别高达 0.523 和 0.265,背风面竖向风速分量无量纲系数分别高达-0.451 和-0.542.而 50 m 和 100 m 高度处的竖向分量最大值仅分别为-0.287 和-0.108.

2)从不同高度迎风面和背风面的竖向分量最大值来看,坡度越小竖向分量风速系数越大,坡度为 1 的山丘模型竖向风速分量相比于其余两种坡度山丘则变化较小。

3)不同坡度和不同高度的数据均表明,山顶位置处的竖向风速分量绝对值最小,也是竖向风速分量方向转变的临界位置,且山顶两侧竖向风速分量极大值出现位置随着高度的上升而向山体边缘方向移动。

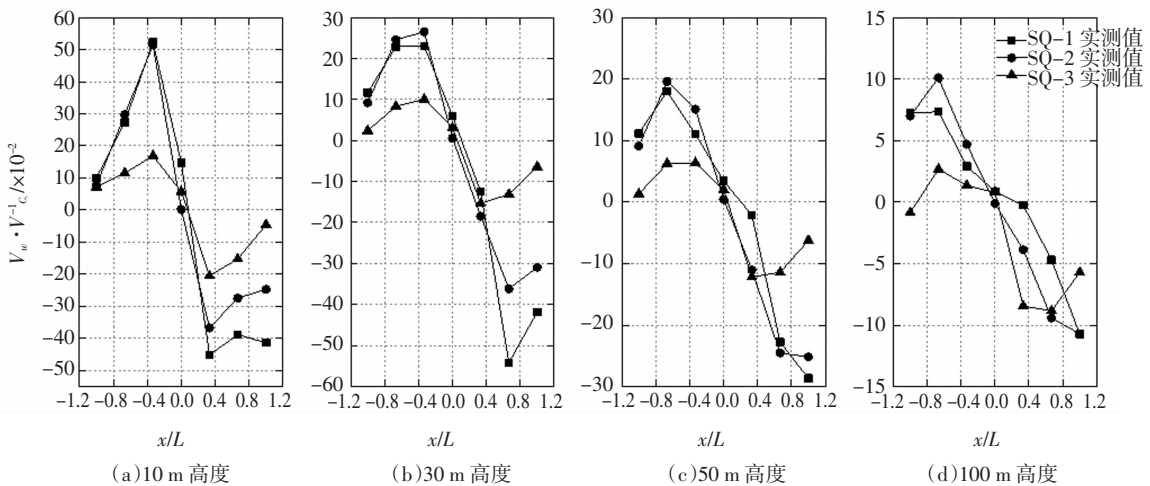


图 8 不同坡度山丘迎、背风坡面竖向风速分量变化

Fig.8 The vertical wind component of the slope on side for different grade

4.2 紊流度变化特性

3 类坡度的山丘模型迎、背风坡面的顺风向紊流度随高度的变化情况如图 9 和图 10 所示.比较分析可知:

1)山体坡度越大则山体表面的紊流度也更大,如坡度 0.176 时的迎风坡与背风坡面的紊流度整体上均小于坡度 0.577 和坡度 1 的山丘,而坡度 0.577 的山丘与坡度为 1 的山丘虽然迎风坡紊流度比较接近,但是坡度 0.577 山丘的背风坡紊流度极大值

比坡度 1 的山丘更小。

2)山丘背风坡面地形修正系数虽然小于山顶位置的数值,但紊流度却明显大于山顶位置,意味着背风坡输电线路结构设计中虽然静力风荷载较小,但是由紊流引起的动力风荷载可能较大.与坡度为 0.176 和 0.577 的两类山体相比,坡度为 1 时的背风侧紊流度大幅增加,在 0.6 倍山体高度处紊流度高达 35%,特别值得设计人员关注。

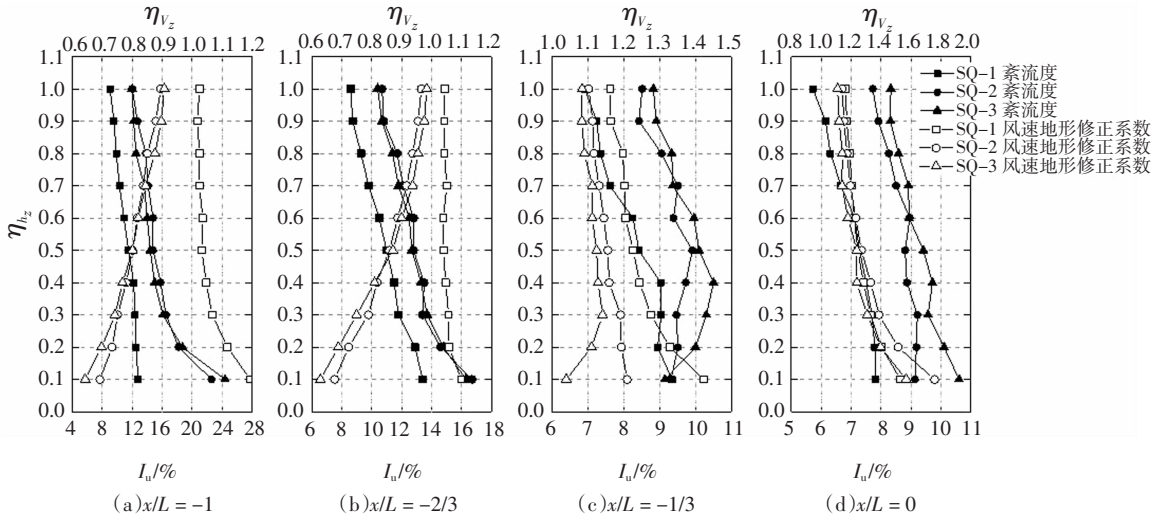


图 9 不同坡度山丘迎风坡面紊流度和风速地形修正系数变化

Fig.9 Turbulence of the upslope for different grade

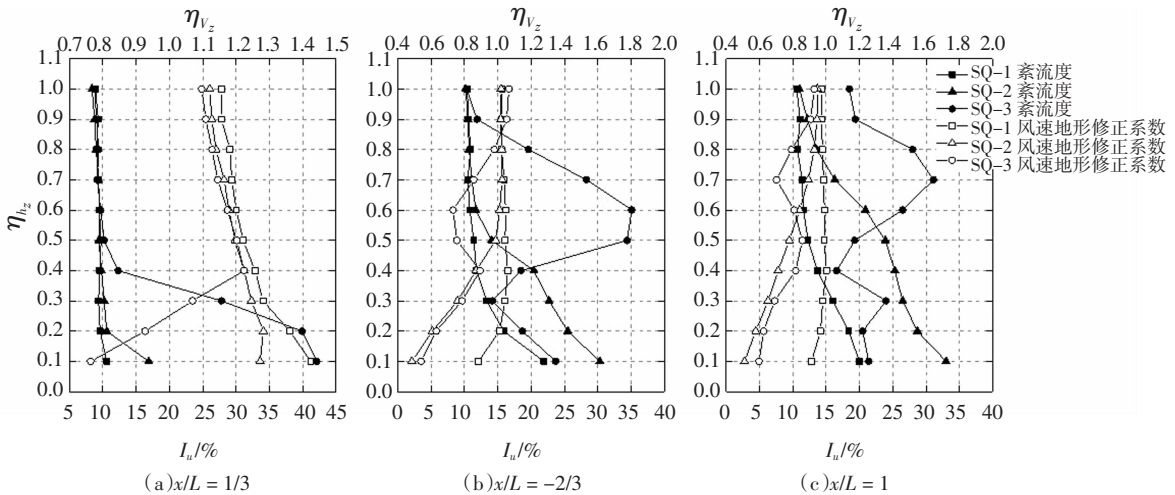


图 10 不同坡度山丘背风坡面紊流度和风速地形修正系数变化

Fig.10 Turbulence and topography factor of the downslope for different grade

5 结论

本文基于 3 种不同坡度山丘地形的风洞试验研究,探讨了顺风向风速地形修正系数、风场竖向风速分量及紊流度变化情况,得到如下主要结论:

1)与 3 类国外规范相比,我国建筑结构荷载规范与高耸结构设计规范对不同坡度山丘山顶处的风速地形修正系数的取值更大;与 3 种坡度山丘风洞试验测试数据相比,我国荷载规范取值整体上是偏于保守的。

2)实测山顶位置的顺风向风速地形修正系数并非完全随坡度增大而增加,坡度大于 0.577 之后达到 1 时,风速地形修正系数反而减小,这一趋势与国内外规范定义的大于某一坡度后可以按照相同数值取值方法一致,但是这一临界坡度国内外取

值和测试值均不相同,需要进一步研究。

3)按照现有文献插值公式计算侧风坡位置风速地形修正系数时,靠近山体表面区域是偏于不安全的;但是高度大于 0.3 倍山体高度范围内插值公式取值偏大。

4)不论是迎风坡还是背风坡,独立山丘不同位置竖向风速分量都比较明显,且数值沿高度增加而减小.3 类坡度山丘在迎风坡和背风坡测试的最大竖向风速分量值与参考来流风速的比值达到 50% 以上。

5)独立山丘表面的紊流度随着山体坡度的增加而增大,特别是坡度较大时背风坡区域的紊流度较大,坡度为 1 时山丘背风侧 0.6 倍山体高度处的紊流度可高达 35%,因此陡峭山坡背风区域的动力荷载在设计中需要仔细考虑。

参考文献

- [1] 陈政清.桥梁风工程[M].北京:人民交通出版社,2005:26—30.
CHEN Z Q.Wind engineering of bridge[M]. Beijing:China Communications Press,2005:26—30.(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] KOBAYASHI M H,PEREIRA J C F, SIQUIERA M B B. Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2D hill [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994,53(3):357—375.
- [4] ISHIHARA T,HIBI K,OIKAWA S.A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999,83:95—107.
- [5] WENG W,TAYLOR P A,WALMSLEY J L.Guide-lines for airflow over complex terrain: model developments[J].Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2000,86(2):169—186.
- [6] 杨靖波,牛华伟,张宏杰.单体山丘越山风流速变化试验研究[J].结构工程师,2013,29(5):108—112.
YANG J B, NIU H W,ZHANG H J.Wind tunnel test study on the influence of single hill on wind velocity [J]. Structural Engineers, 2013,29(5):108—112.(In Chinese)
- [7] 李正良,徐姝亚,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 Z L,XU S Y,XIAO Z Z,*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)
- [8] 沈国辉,姚旦,楼文娟,等.单山和双山风场特征的CFD数值模拟[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):37—44.
SHEN G H,YAO D,LOU W J,*et al.* Investigation of the wind field characteristics on Isolated hill and two adjacent hills using CFD numerical simulation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2016,43(1):37—44.(In Chinese)
- [9] BOWEN A,JLINDLEY D.A wind-tunnel investigation of the wind speed and turbulence characteristics close to the ground over various escarpment shapes[J].Bound Layer Meteorol,1997(12):259—271.
- [10] CAO S,TAMURA T.Experimental study on roughness effects on turbulent bound layer flow over a two-dimensional steep hill[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006,94:1—19.
- [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 Z Q,LI C G,ZHANG Z T,*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] 庞加斌,宋锦忠,林志兴.山区峡谷桥梁抗风设计风速的确定方法[J].中国公路学报,2008,21(5):39—44.
PANG J B,SONG J Z,LIN Z X.Determination method for wind-resistant design wind speed of mountainous-valley bridge[J].China Journal of Highway and Transport,2008,21(5):39—44.(In Chinese)
- [13] MOMOMURA Y,MARUKAWA H,OKAMURA T,*et al.* Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1997,72:241—252.
- [14] OKAMURA T,OHKUMA T,HONGO E,*et al.* Wind response analysis of a transmission tower in a mountainous area [J].Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2003,91(1):53—63.
- [15] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012:30—33,218—222.
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S].Beijing: China Architecture & Building Press,2012:30—33,218—222.(In Chinese)
- [16] GB50135—2006 高耸结构设计规范[S].北京:中国计划出版社,2007:9—11.
GB50135—2006 Code for design of high-rising structures [S]. Beijing: China Planning Press,2007:9—11. (In Chinese)
- [17] ASCE/SEI 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures [S].Reston, Virginia: American Society of Civil Engineering, 2010: 251—254.
- [18] EN 1991-1-4 Eurocode 1.Actions on structures-part 1-4:general actions-wind actions [S].Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2005:97—102.
- [19] AS/NZS 1170.2:2002 Structural design actions part2: wind actions [S].Sydney: Australian/New Zealand Standard, 2002:22—23.
- [20] 李正良,魏奇科,孙毅.山地地形对输电塔风振响应的影响[J].电网技术,2010,34(11):214—220.
LI Z L,WEI Q K,SUN Y. Influences of mountain topography on response to wind induced vibration of transmission tower [J]. Power System Technology,2010,34(11):214—220. (In Chinese)
- [21] MATTUELLA J M L,LOREDO-SOUZA A M,OLIVEIRA M G K,*et al.* Wind tunnel experimental analysis of a complex terrain micro-siting [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016, 54:110—119.
- [22] BRIAN R M,GUY L L.Reynolds-number and surface-modeling sensitivities for experimental simulation of flow over complex topography[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2012(104/106):603—613.
- [23] 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)
- [24] 李正昊,楼文娟,章李刚,等.地貌因素对垭口内风速影响的数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(5):849—855.
LI Z H,LOU W J,ZHANG L G,*et al.* Numerical simulation of effects of topographic factors on wind speed in col [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2016,50(5):849—855. (In Chinese)
- [25] 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,2014:23—26.
YAO D. 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,2014:23—26.(In Chinese)