

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.035



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



复杂山地地形光伏电站的三维风场特性

张敦元^{1,2}, 马竞涛³, 苏才军², 高珂³, 周海希², 汪润章^{1,2}, 杨波⁴

(1. 四川蜀道清洁能源集团有限公司 建设管理分公司, 成都 610041; 2. 盐源蜀道清洁能源有限公司, 四川 西昌 615700; 3. 隆基乐叶光伏科技有限公司, 西安 710018; 4. 重庆大学 土木工程学院; 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400045)

摘要:为探究凉山盐源高原山地典型光伏电站选址地形对风场特性影响,以实际光伏场址三维地形为基础,采用风洞试验和CFD数值模拟相结合的方法开展研究。首先基于Global Mapper与Rhino软件建立真实山地缩尺地形模型,依托直流式风洞,采用眼镜蛇三维脉动风速测量系统对0°~315°共8种风向条件下不同典型位置和高度处的三维风速进行测量,系统分析不同风向角下典型地形水平风速加速效应及竖向风速分布特征;将不同风向角下典型地形位置的水平风速加速比与规范推荐值进行对比分析。随后基于风洞试验数据建立CFD分析模型,对不同风向条件下整体地形风场进行数值模拟,以揭示水平风速空间分布规律。结果表明,复杂山地地形对近地层风场具有显著影响,不同地形位置和风向角下水平风速加速效应差异显著,且随高度增加逐渐减弱;现行规范在山顶及山腰区域给出的水平风速加速比整体偏于保守,其中美国规范与试验结果吻合度较高;不同工况下竖向风速占比整体较小,但在山腰及局部地形突变区域的中低高度范围内仍存在显著抬升或下沉气流。

关键词:光伏电站;风洞试验;复杂山地地形;水平风速;地形加速效应;竖向风速

中图分类号: TU312.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-15

Three-dimensional wind field characteristics of photovoltaic power stations under complex mountainous terrain

ZHANG Dunyuan^{1,2}, MA Jingtao³, SU Caijun², GAO Ke³, ZHOU Haixi²,
WANG Runzhang^{1,2}, YANG Bo⁴

(1. Construction Management Branch, Sichuan ShuDao Clean Energy Group Co., Ltd., Chengdu 610041, P. R. China; 2. Yanyuan ShuDao Clean Energy Co., Ltd., Xichang 615700, Sichuan, P. R. China; 3. Longi Green Energy Technology Co., Ltd., Xi'an 710018, P. R. China; 4. School of Civil Engineering; State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To investigate the topographic effects of typical photovoltaic sites on wind field characteristics in the plateau mountainous area of Yanyuan County (Liangshan Prefecture), a combined approach involving wind

收稿日期: 2026-02-13

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFF0505400)

作者简介: 张敦元(1988-), 男, 主要从事新能源结构抗风、抗震研究, E-mail: kmustzdy@163.com。

杨波(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yang0206@cqu.edu.cn。

Received: 2026-02-13

Foundation item: National Key Research and Development Program (No. 2024YFF0505400)

Author brief: ZHANG Dunyuan (1988-), main research interests: wind-resistant and seismic-resistant structural in the field of new energy, E-mail: kmustzdy@163.com.

YANG Bo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yang0206@cqu.edu.cn.

tunnel experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations was adopted based on the refined three-dimensional terrain of an actual photovoltaic power station. First, a scaled terrain model representing the natural mountainous landform was established using Global Mapper and Rhino software. Wind tunnel tests were conducted in the closed-circuit wind tunnel. A Cobra probe anemometer was employed to measure the three-dimensional wind velocity at different representative positions and vertical heights under eight wind directions ranging from 0° to 315° . Based on the experimental data, terrain-induced horizontal wind speed-up effects and the distribution patterns of vertical wind velocity were systematically analyzed. Additionally, horizontal wind speed-up ratios at typical topographic locations were compared with the recommended values stipulated by mainstream international design codes. Subsequently, a CFD model was calibrated against wind tunnel measurements to conduct full-terrain wind field simulations under varying wind directions, aiming to clarify the spatial distribution characteristics of horizontal wind velocity. The results indicate that complex mountainous terrain has a significant impact on the near-surface wind field. The horizontal wind speed-up effect varies considerably with terrain location and wind direction, and gradually declines with increasing height. The horizontal speed-up ratios specified in current international codes are generally conservative for ridge tops and mid-slope regions, among which the American code shows relatively good agreement with the experimental results. Although the overall proportion of vertical wind speed is small under most conditions, noticeable updrafts and downdrafts still occur at low to intermediate heights in mid-slope areas and regions with abrupt terrain changes. The findings of this study provide experimental evidence and reference values for the wind-resistant design of photovoltaic support structures and the determination of wind load parameters in complex high-altitude mountainous areas.

Keywords: photovoltaic power plants; wind tunnel test; complex mountainous terrain; horizontal wind speed; terrain-induced acceleration; vertical wind speed

随着全球能源消耗加剧,环境污染问题日益突出。中国丘陵、山地面积约占国土总面积 70%,山区蕴藏着丰富的风能和太阳能等清洁能源,山地光伏发电和风力发电得到快速发展^[1]。在此背景下,山地复杂地形上的风场对于风电机组、输电线路和光伏支架等风敏结构抗风设计具有重要影响^[2]。

随着太阳能等清洁能源开发的不断深入,光伏电站选址开始由风荷载稳定、施工条件优越的简单地形向湍流强度高、施工条件复杂的山地地形发展。四川盐源地区为典型高原山地地形,平均海拔约 3 000 m,地形起伏大、地势复杂。受地形条件及历史观测基础薄弱等因素限制,项目所在山区尚未布设长期气象观测站,导致工程设计所需参考风压及风速参数难以直接获取。高海拔地区空气稀薄且湍流强烈,加之地形效应显著,实际风场特征往往较平原地区更为复杂^[3]。在复杂山地环境中,风流经过山脊、峡谷或垭口等特殊地形时,会产生明显的风速放大效应,局部区域风速可能远高于区域平均设计风速^[4]。在较大风速作用下,光伏组件可能发生振动、隐裂或断裂,严重时甚至导致支架变形或倒塌,从而带来重大经济损失和安全隐患^[5-6]。因此,系统探究复杂山地环境下的风荷载特性,对于保障光伏电站的安全运行具有重大意义。

为考虑地形因素对风速影响,学者大多采用风速修正系数方式对其进行分析^[4]。即在平地风速的基础上取得复杂地形条件下的设计风速,并通过其与来流参考风速的比值对风速变化特征进行评价。然而,不同国家规范中关于山地风速地形修正系数的取值并未形成统一标准^[7]。早期相关研究主要采用较为规则的二维山脊或三维独立山丘组成的理想模型开展地形风场特性分析。如 Lubitz 等^[8]通过风洞试验研究了来流风向角对二维和椭圆形底面三维山体不同位置处加速比的影响,并将试验结果与实测风速资料进行对比。李正良等^[9]通过风洞试验,系统探究了不同山体间隔距离、不同遮挡山体坡度和高度的三维山体模型风荷载特性。然而采用理想化的二维或三维模型难以还原真实山地的三维拓扑复杂性、气流三维耦合效应及非稳态湍流特性,可能导致风场模拟精度受限。随着计算与试验技术的发展,针对真实三维山地模型开展风荷载特性的研究逐渐增多。如沈国辉等^[10]采用基于眼镜蛇测量仪的风洞试验方法,获得了某复杂山体的三维风场特征,并分析各风向角下水平风速加速比和竖向风速占比的分布规律。张会阳等^[11]基于 RANS 开展了三维山地风场数值模拟研究,指出 SST $k-\epsilon$ 模型在风速加速比预测方面具有较好的适用性。

郭文星^[12]针对复杂山地地形风场进行了CFD多尺度数值模拟,认为RNG $k-\epsilon$ 和SST $k-\omega$ 模型较适合用于近地边界层湍流流动模拟,同时指出指数律与对数律入口速度剖面对模拟结果的影响较小。相较于理想化模型,采用三维山地模型能够更真实地再现山地空间形态,捕捉复杂地形条件下气流的三维耦合运动,并考虑非理想因素引起的空间非均匀性,从而为光伏电站结构的抗风设计提供更为可靠的依据。然而,相关研究成果尚未形成统一的规范标准,且其不同地形条件下适用性仍存在一定局限。此外,与平原地区相比,高原山地地区由于空气密度降低、大气稳定度变化和复杂地形叠加作用,其近地层风场结构往往更加复杂。虽然空气密度降低会在一定程度上减小风压,但复杂地形所引起风速加速效应及湍流增强现象仍可能对结构安全产生重要影响。因此,有必要针对盐源地区实际光伏电站所处地形特征开展风场特性研究,以揭示复杂地形条件下气流加速与三维扰动的空间分布规律。

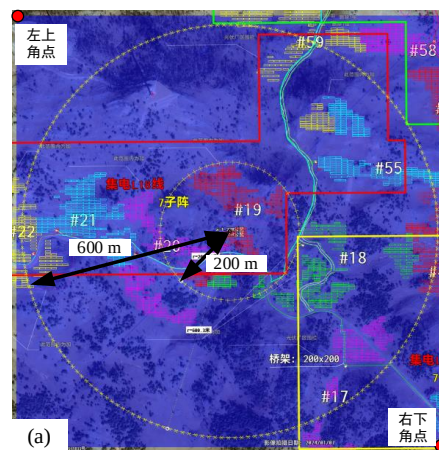
针对复杂高原山地光伏电站场址风场特性认识不足的问题,笔者以盐源高原山地某光伏电站场区实际地形为研究对象,对典型山地地形条件下近地层三维风场特性开展研究。通过风洞试验与CFD数值模拟相结合的方法,系统分析不同风向条件下光伏方阵区域水平风速加速比、湍流特性及竖向风速占比的空间分布规律,并将典型地形位置的水平风速加速比与多国规范推荐值进行对比分析。

1 风洞试验

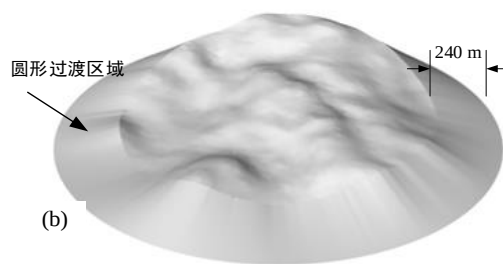
1.1 地形模型建立

选取凉山盐源高原山地某典型光伏场址作为研究对象,主要基于其明确的工程背景与地形代表性两方面考虑:1)该区域为实际规划建设的光伏电站场址,地形起伏显著,属于典型复杂山地地貌,具有突出的工程应用价值;2)研究区域内同时包含山顶、山腰及坡面过渡等多种典型地形单元,能够较为全面地反映复杂三维地形对局部风场分布的综合影响,因此在复杂山地风场特性研究中具有良好的代表性。具体建模过程:以#19号方阵光伏电站所在区域为中心建立地形模型,该方阵平面直径范围约为400 m,如图1(a)所示。结合风洞试验开展条件,并在保证模型尺寸尽可能大的前提下,以#19光伏方阵中心点为圆心,在实测地形图上选取直径为1 200 m的范围作为本次风洞试验的研究范围。基于已知地理信息数据,借助Global Mapper软件构建地形表面特征模型^[13]。为减弱模型边缘断面导致

的地形突变对风场分布影响,在原始地形计算区域外侧设置统一高程的平坦地形作为过渡区域^[14],如图1(b)所示。具体扩展方法为:首先以地形曲面中心为圆点,裁剪出1个直径为1.2 km的圆形地形曲面;随后使用Rhino软件混接曲面,将该圆形地形曲面的边缘连接至直径为1.68 km的圆形平面上,即形成环形宽度约240 m的过渡区域。几何模型建立完成后,委托3D模型打印公司进行加工制作。



(a) 项目建设场地



(b) 山体模型建立

图1 光伏特征地形选取方案

Fig.1 Selection scheme for characteristic photovoltaic terrain

1.2 试验方案

依托重庆大学直流式风洞开展相应风洞试验,风洞试验段尺寸为 $2.4\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 15\text{ m}$ (宽 $\times$ 高 $\times$ 长),能够满足复杂地形模型的物理模拟要求。在模型尺度确定过程中,综合考虑了风洞试验段的尺寸、来流充分发展长度及阻塞比等因素。为保证模型在试验段内具有足够的来流发展空间,并避免因模型尺度过大导致阻塞效应对流场产生的显著干扰,同时结合既有复杂地形风洞试验研究经验^[10]对原型地形进行合理缩尺。最终设置几何模型缩尺比为1:1 000。受模型加工精度条件限制,采用相对光滑的模型表面处理方式,以重点分析宏观地形起伏对风场结构的影响。测点布置方案及具体位置

如图2所示。研究区域为典型复杂山地地形,山脊走向及坡面朝向具有明显方向性特征。图2(a)所示测点布置方案涵盖了项目场地光伏安装区域,同时兼顾整个地形范围内的山顶、局部低谷和山脚等典型地形位置。为系统分析不同来流方向条件下地形对风场分布的影响,选取能够覆盖沿山脊、垂直山脊及斜向等典型来流工况的多个风向角,以揭示不同来流条件下地形加速效应及流动结构差异。为实现对360°全风向范围的系统覆盖,试验共设置8种不同来流风向角工况,分别为0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°和315°,具体布置如图2(b)所示。在现有复杂地形风洞试验研究中,亦多采用45°间隔开展风向敏感性分析^[15, 16]。

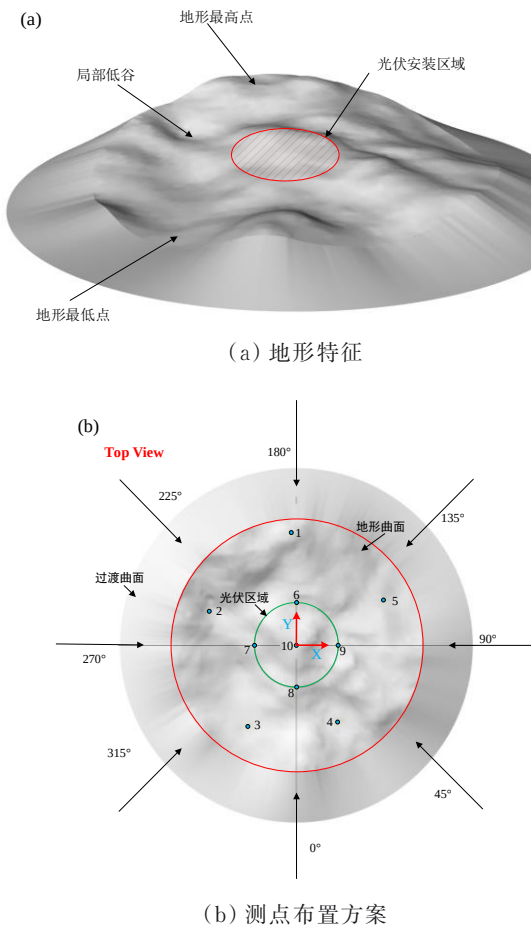


图2 测点选择方案
Fig.2 Measurement point selection scheme

风洞试验开展方案如图3所示。风速测量采用眼镜蛇三维脉动风速探针完成。在试验准备阶段,首先在风洞前方来流方向布置地表粗糙单元以模拟实际地表粗糙度条件;随后将三维山体模型固定于圆形转盘中心位置,并完成眼镜蛇三维脉动风速探针及三维移测架等测量系统的安装与调试工作。在正式试验阶段,通过旋转圆形转盘调节模型朝向以模拟不同风向工况,控制三维移测架带动眼镜蛇

三维脉动风速探针在预设测点位置采集三维风速时程数据。各风向工况下,设定风洞试验机运行风速均为15 m/s,达到设定值后使风机持续稳定运行约2~3 min,以保证流场充分发展。为验证流场稳定性,风机稳定运行过程中对同一测点进行两次独立采样并对比统计结果。结果表明,眼镜蛇三维脉动风速探针数据采集过程中的Good Data率均高于98%。两次测得数据结果的平均风速波动幅度均 $\leq 2\%$,湍流强度变化 $\leq \pm 0.5\%$,俯仰角与偏转角在稳定连续段内波动范围控制在 $\pm 1^\circ \sim \pm 2^\circ$ 以内。单点测量采用眼镜蛇三维脉动风速探针同步采集瞬时风速分量,设置采样频率为500 Hz,连续采样时间为1 min,每个测点共获取30 000组瞬时数据。单个工况测试完成后,依次切换风向条件并重复测量流程,完成多工况试验。此外,在各测点沿竖向布置10个测量高度,分别为3、6、9、12、15、18、22、28、35、45 cm,以获取不同高度处的三维风速分布特征。

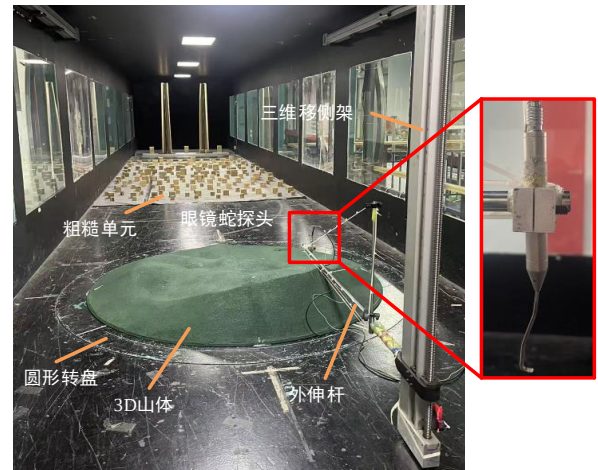


图3 试验开展方案
Fig.3 Experimental scheme

借助Rhino软件对各测点的三维坐标进行整理与汇总。依据图2(b)所示测点布置方案,对各测点空间坐标进行了提取与统一整理,相关数据汇总于表1。其中, x 与 y 坐标定义如图2(b)所示, z 坐标定义为各测点地形表面相对于图1(b)所示圆形过渡区最低平面的垂直距离。获取该坐标数据的意义主要为:1)明确各测点在三维地形模型中的空间位置,并为后续分析不同测点水平风速加速比、湍流特性及竖向风速分布规律提供统一的空间参照;2)为CFD数值模拟结果与风洞试验数据之间的空间对应与对比分析提供基础;3)在风洞试验实施过程中,测点坐标数据亦可用于辅助仪器支架的快速定位,提高测量效率与重复性。

风洞试验模拟了符合《建筑结构荷载规范》

表 1 不同测点坐标

Table 1 Coordinates of different measurement points

测点	x/m	y/m	z/m	测点	x/m	y/m	z/m
P1	-26	534	211.331	P6	0	200	133.266
P2	-419	161	85.048	P7	-200	0	89.806
P3	-233	-386	13.363	P8	0	-200	95.988
P4	196	-365	47.931	P9	200	0	116.527
P5	416	215	78.933	P10	0	0	145.987

(GB 50009—2012)^[17]中地形类别 B 的边界层风速剖面,地面粗糙度指数为 0.15。风洞试验模拟的 B 类地貌大气边界层中,同样设置风机来流运行风速为 15 m/s。基于试验测得的数据,获得了山地模型前方 30 cm 处平均风速及湍流强度的非量纲剖面。图 4 展示了风洞试验与设计规范推荐曲线之间的对比结果。结果表明,风洞试验模拟的大气边界层风场与规范推荐特性总体一致,能够满足风洞试验的相似性要求和模拟精度要求。

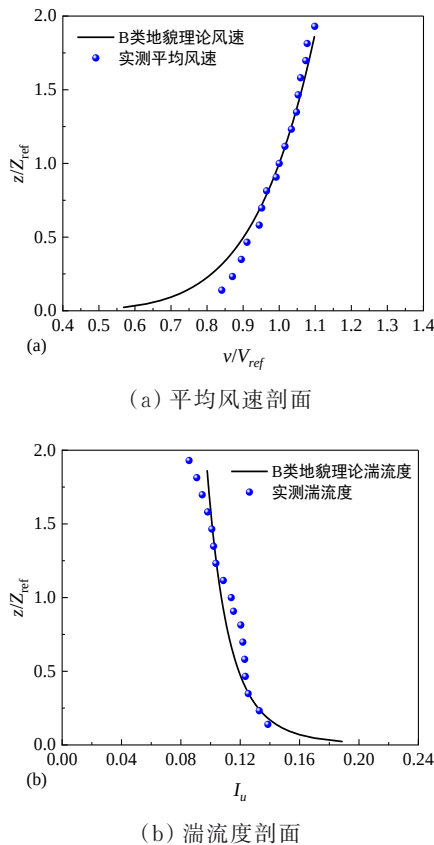


图 4 风洞试验与规范对比

Fig.4 Comparison between wind tunnel test results and code provisions

2 复杂山体水平加速效应研究

2.1 水平风速加速比

在风工程和结构荷载计算领域,通常采用水平风速加速比来量化风速随高度变化的增强效应。

该参数定义为某一特定高度处的水平风速与参考高度处水平风速之间的比值。数学表达如式(1)所示。

$$S_u(z) = \frac{V_u(z)}{V_0(z)} \quad (1)$$

式中: $V_u(z)$ 为距离山体表面 z 高度处的平均风速; $V_0(z)$ 为来流在对应高度处的平均风速。

2.2 不同测点位置水平风速加速比分析

借助风洞试验获得了图 2 中所有测点位置和高度处水平风速加速比数据,如图 5 所示。结果表明,所有风向角条件下 P1~P10 测点的水平风速加速比均呈现较大波动,复杂多变的山区地形会对水平风速加速效应产生显著影响。此外,不同风向角下各测点水平风速加速比数值均随高度增加逐渐趋于稳定,当高度大于 350 m 时其数值均接近于 1,表明地形对风场的影响随高度升高而显著减弱。

如图 5(a) 所示,不同风向角情况下,位于山顶位置的 P1 测点在各个高度处均表现出明显水平风速加速效应,且其水平风速加速比随高度增加呈减小趋势。风洞试验结果表明,相较于其他测点, P1 测点在各风向角和高度条件下的水平风速加速比均大于 1,说明山顶地形对来流气流具有显著的加速作用。当风向角为 180° 且高度约为 30 m 时,试验获得的水平风速加速比达到最大值,约为 1.25。该现象主要与山顶区域的地形抬升作用及流线压缩效应有关。P1 测点位于研究区域的最高点附近,当来流气流沿迎风坡向山顶爬升时,气流受地形抬升作用影响产生明显的流线收缩,从而使局部气流量重新分配并形成风速增强现象^[18]。此外,当风向角为 180° 时,来流方向与山体主坡向较为一致,气流沿坡面抬升过程相对连续,绕流及能量损失较小,使峰顶附近的地形诱导加速效应更加显著。与此同时,30 m 高度仍处于地形加速效应影响较为显著的近地层范围,因此在该风向与高度组合条件下观测到较为明显的风速放大现象^[19]。需要指出的是,该水平风速加速比数值为基于该特定三维地形模型及风洞试验条件获得的结果,其数值大小与山体坡度、脊线形态、周围地形遮挡以及来流风向等因素密切相关。在实际复杂山地环境中,不同地形条件可能产生不同程度的风速加速效应。因此,该结果主要用于反映本研究地形条件下的风场变化特征,而不代表所有山地地形在相同风向条件下均会出现相同数值的加速比。

如图 5(b) 和 (c) 所示,在不同风向角条件下 P6 和 P7 测点的水平风速加速比整体呈现出随高度增加而逐渐增大的变化趋势,但其数值最大值均小于

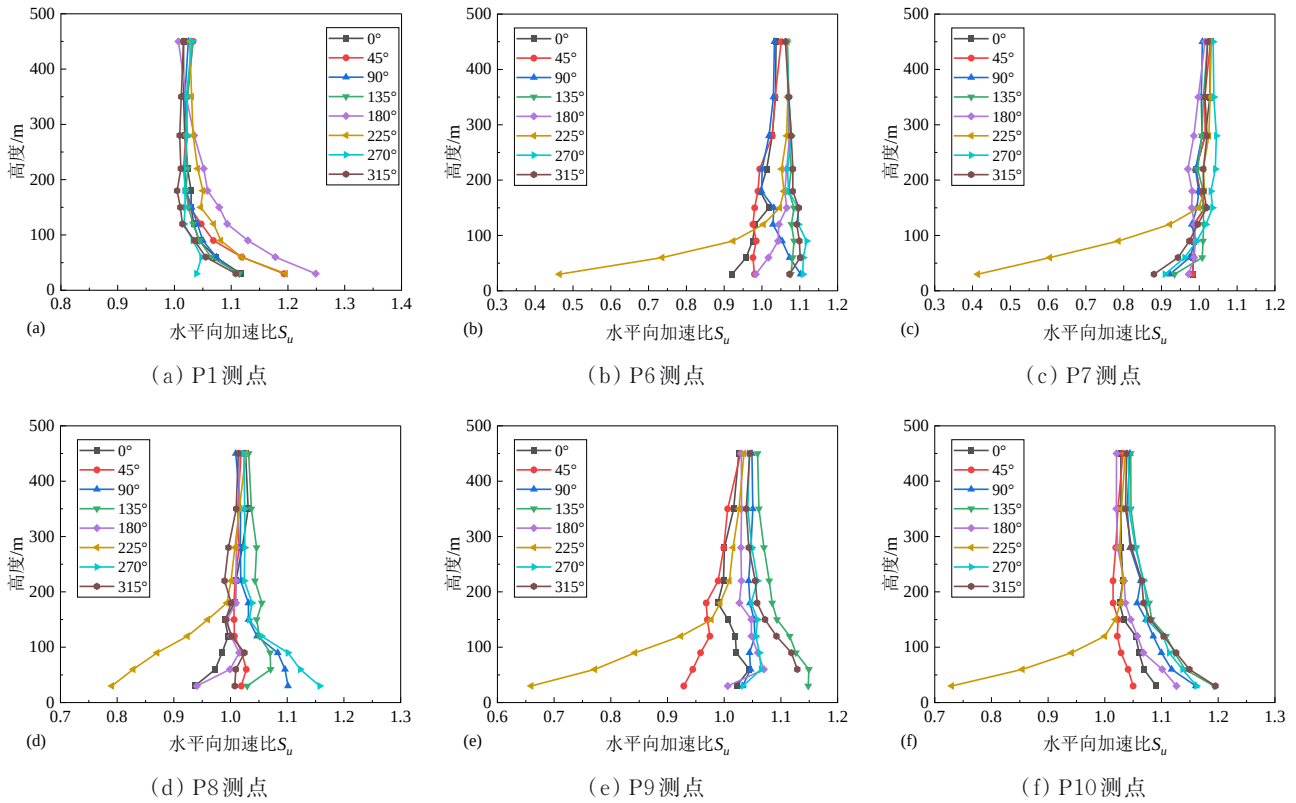


图5 不同测点位置的水平风速加速比

Fig.5 Horizontal wind speed-up ratio at different measurement point locations

1.1. 此现象表明该区域虽受到一定程度地形诱导加速作用,但整体风速放大效应较为有限。结合图2所示测点布置方案可以发现,P6和P7测点位于坡面或相对平缓地形区域,来流在抬升过程中同时伴随明显的绕流与动量耗散,使地形对气流的压缩作用受限,从而抑制了风速的进一步放大^[20]。当风向角为225°时,P6~P10测点的上方30 m高度处均出现水平风速加速比最小值。此现象表明在该风向条件下,来流与局部地形坡向及脊线分布不一致,气流在到达测点前易受到上游地形的遮挡与扰动^[21],从而在30 m高度范围内表现出明显的减速特征。如图5(d)~(f)所示,P8~P10测点上方30 m高度处的水平风速加速比出现局部最大值,但其均小于1.2。该现象表明即便在相对有利的来流条件下,该区域的地形加速效应仍处于中等水平。这与P8~P10测点多位于峰顶附近的次级地形或脊线过渡区有关^[22]。气流在此虽存在一定程度的抬升与流线收缩,但同时伴随明显的三维绕流和侧向扩散,限制了风速极值放大。分析结果进一步表明,不同风向角下地形与气流相互作用差异显著控制各测点风速加速特征,而在30 m高度范围内,地形遮挡、绕流及湍流耗散等因素对风速放大效应具有重要制约作用。

依据图1所示光伏方阵施工方案并结合上述分

析结果,系统探讨了该地形条件对来流风场产生的水平风速加速效应差异。中国规范《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[17]推荐水平风速加速比设计值范围为1.1~1.23。为兼顾安全性和经济性,在实际高原山地大风区的光伏建设过程中,设计单位通常采用1.2的水平风速加速比作为结构抗风设计参数。由图5中P6~P10测点的风洞试验数据可知,该区域在多风向控制条件下所获得的水平风速加速效应整体低于现行规范建议取值。该现象表明在此类地形条件下,现有设计参数具有一定程度的保守性。因此,在充分满足结构安全性与可靠性要求前提下,为兼顾工程经济性并降低结构设计成本,该区域的水平风速加速比设计值可适当下调。基于本研究对复杂山地地形水平加速效应的系统分析结果,针对复杂山地条件下的光伏支架结构抗风设计,提出以下设计建议:

1) 山顶区域受地形抬升与来流收缩效应的共同影响,往往表现出显著的水平风速加速特征。在进行建筑物或构筑物选址时,应避免优先布置于此类区域;若受场地条件限制无法避让,建议结合风洞试验结果,适当提高相应的抗风安全裕度。

2) 山脚部位的相对平缓地段以及如图2(a)所示的地形局部低谷区域,来流风速受地形影响较小,水平风速加速效应不明显。在工程设计中,可

在合理假定条件下对该类区域的风速加速效应予以弱化处理或适当忽略。

3) 对于地形局部突起或不规则凸出区域(如 P6~P10 测点所在区域),尽管整体加速效应弱于山顶位置,但在特定风向角条件下仍可能产生局部风速放大现象,对光伏支架结构产生不利影响。因此,该类区域在工程设计中同样应作为重点控制部位加以关注。

2.3 水平风速加速比与各国规范对比

针对山区风场,不同国家规范对山坡、山峰及垭口等典型地形条件下的水平风速加速效应均做出了相应规定。基于试验分析结果,选取中国^[17]、欧洲^[23]、澳大利亚^[24]、美国^[25]和日本^[26]等相关规范进行对比分析。中国规范中关于风压地形修正系数采用的是 η_p ,其他国家规范则采用的是风速地形修正系数 η_v 。两者之间转换关系式为

$$\eta_v = \sqrt{\eta_p} \quad (2)$$

为保证与各规范中水平风速加速比定义的一致性,选取迎风工况下的试验数据进行对比分析。选取整个山体地形中具有代表性的 3 个典型位置进

行研究,分别为山顶位置 P1(180°方向)、山腰位置 P10(315°方向)以及山脚位置 P3(90°方向)。依据表 1 所列各测点坐标信息,结合各规范中推荐的计算方法,分别获得不同地形位置处规范推荐水平风速加速比设计值,并将其与风洞试验结果进行对比分析,如图 6 所示。结果表明,在坡度较大的山顶区域,各规范在计算水平风速加速比时给出的推荐值整体偏于保守。其中,中国规范提供的设计值最为保守,而美国规范给出的设计结果与风洞试验数据吻合度较高。随着高度的增加,各规范推荐水平风速加速比与风洞试验结果之间差异呈逐渐减小的趋势。对于山腰 P10 测点位置,风洞试验结果与各规范的对比同样表明,现行规范普遍采用了较为保守的设计取值。其中,中国规范与日本规范的保守性最为明显,而美国规范的计算结果更接近试验实测值。在山脚 P3 测点区域,由于其位置接近地表,实测水平风速加速比整体较小,明显低于各规范推荐值;但随着高度的增加,水平风速加速比逐渐增大,并呈现出与各规范推荐值逐步趋于重合的变化趋势。

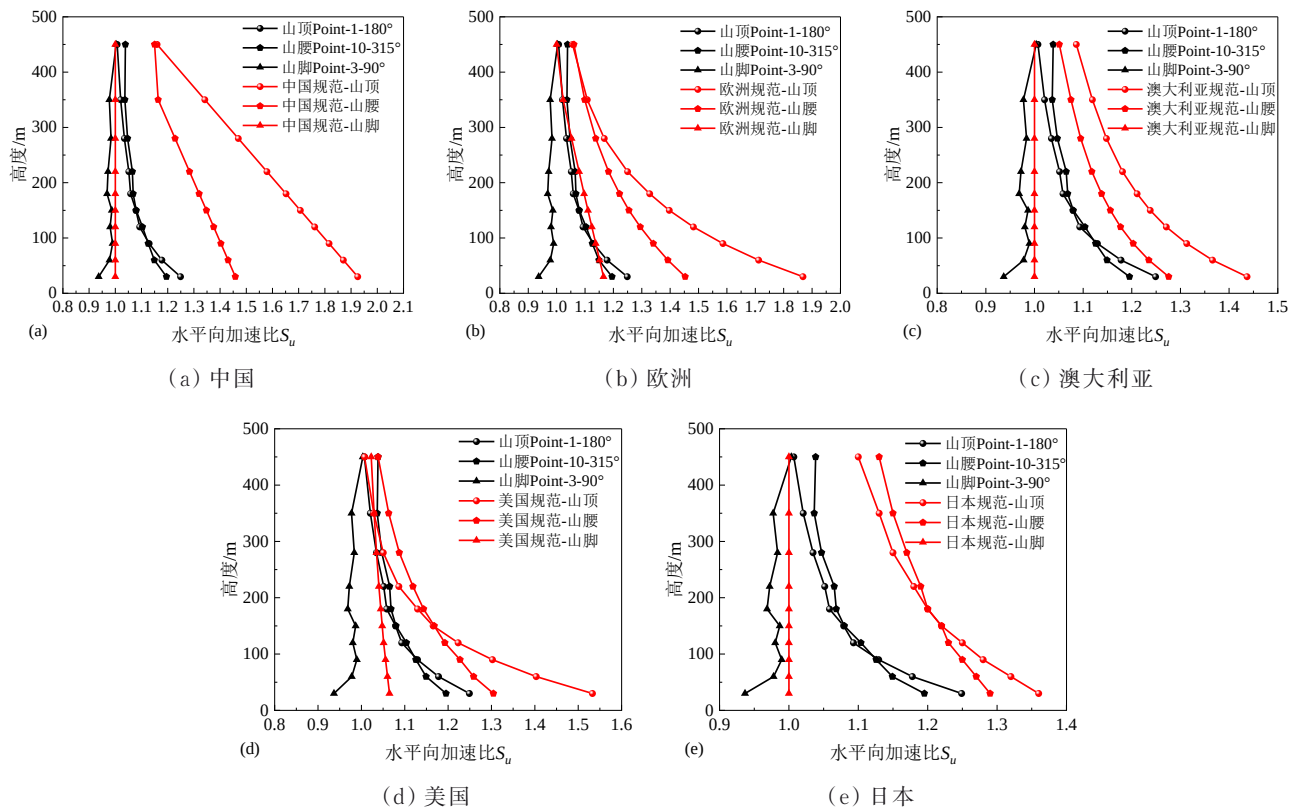


图 6 典型测点位置风洞试验数据与各国规范对比

Fig.6 Comparison of wind tunnel test data at typical measurement locations with international code provisions

需要指出的是,不同规范在地形风速修正系数的计算方法和参数设定方面存在一定差异。中国规范主要通过风压地形修正系数 η_p 反映山地地形

对风压的放大效应,其表达形式相对简化;日本、欧洲规范、澳大利亚规范以及美国规范则采用风速地形修正系数形式,并在模型中考虑山体高度、坡度

以及迎风位置等因素。由于各规范建立时依据的试验数据、理论模型以及适用地形条件不同^[7],其对地形影响范围和高度衰减规律的描述存在差异,从而导致不同规范计算得到的水平风速加速比存在明显差别。当前各现行规范中推荐的水平风速加速比设计值针对迎风工况给出,且未对侧面及背风面来流条件作出明确规定。现行规范中对坡度及坡面参数的处理也主要采用粗略的参数化方法,对复杂地形中坡度变化、坡向与脊线分布等因素未给出细致规定。这意味着规范在面对真实三维复杂地形时,难以全面反映坡度引起的局部风速变化特征,尤其是在陡坡或非均匀坡面条件下可能低估或高估风荷载效应。因此,各规范在复杂山地条件下的适用性仍存在一定局限。针对复杂山体地形中的建筑物或构筑物,为准确评估不同关键位置处的水平风速加速效应,建议采用风洞试验方法以获取多来流方向条件下的风速分布特征及相应的加速效应参数,进而为结构抗风设计提供更为可靠的依据。

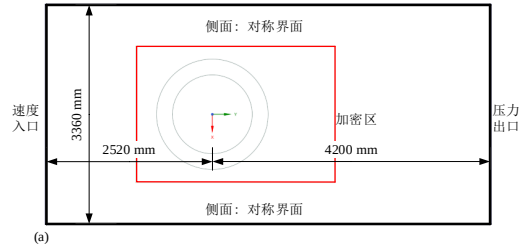
2.4 微地形风场 CFD 数值模拟

为从整体地形尺度进一步分析风场分布特征,基于风洞试验数据建立 CFD 数值模型。采用 Fluent 软件开展 CFD 数值风洞模拟,对该地形 8 个不同风向角(0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°和 315°)条件下的风场特性进行分析。

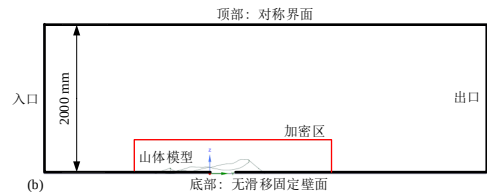
CFD 数值风洞模拟中,合理确定计算域的尺寸对保证风场模拟精度、避免因计算域过大造成网格量冗余而降低计算效率至关重要。综合权衡计算效率与模拟精度的双重要求,确定数值风洞的计算域几何尺寸如下:入口高度 2 000 mm,地形模型底面海拔高度取 0 mm;计算域宽度 3 360 mm,上游延伸长度 2 520 mm,下游延伸长度 4 200 mm。该计算域的平面及立面示意图详见图 7。

为保证计算精度并节约计算成本,采用分块网格划分方法。针对山体区域水平风向设置最大网格间距为 1 mm,同时在山体的上下游区域创建 1 个加密区,该区域的水平方向最大网格间距为 5 mm。计算域底部水平方向最大网格间距为 20 mm,其余区域最大网格间距为 100 mm。近地面划分边界层网格,首层边界层网格高度为 0.5 mm,从上至下网格高度的增长率为 1.1,共划分 30 层。山地表面地形模型的网格划分结果如图 8 所示。

流场入口采用指数风速形式,根据风洞试验参数设置一致,即采用《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[17]中推荐公式作为输入条件。来流边界处的湍流动能 k 和湍流耗散率 ϵ 的计算式为



(a) 计算域平面示意图



(b) 计算域立面示意图

图 7 CFD 数值风洞计算域设置

Fig.7 Computational domain of the CFD numerical wind tunnel

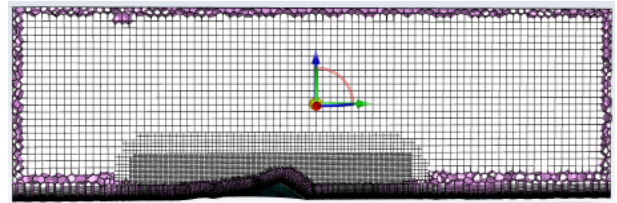


图 8 CFD 计算模型网格划分示意图

Fig.8 Schematic of mesh generation for the CFD model

$$k = \frac{3}{2} (U_z I_z)^2 \quad (3)$$

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

式中: U_z 为风场入口处的平均风速; I_z 为风场入口处的湍流强度; l 为湍流积分尺度; $C_\mu^{3/4}$ 为经验常数,取值为 0.09。速度入口边界条件采用 UDF(自定义函数)编程,计算时将 UDF 源代码导入解释器进行编译。CFD 分析过程中,假设空气为不可压缩流体,计算模型采用 Realizable k-epsilon 模型^[27],对流项离散采用二阶迎风格式,速度压力耦合采用 SIMPLEC 算法。迭代的收敛标准为所有控制方程的相对迭代残余量均小于 1×10^{-3} ,且同时监测到各测点的风速基本不发生变化时,认为所得流场达到稳态。

为验证所建立数值分析模型的可靠性,首先对 CFD 模拟结果与风洞试验结果进行了对比分析。在 0° 风向角下,提取数值风洞中 P10 测点沿竖直方向不同高度处的水平风速,并与风洞试验结果进行对比。风速数值及误差统计结果详见表 2。结果表明,风洞试验和数值模拟的风速误差及水平风速加速比误差绝对值最大值均小于 5%,验证了所建立

CFD分析模型的准确性。

表 2 试验与数值模拟结果对比
Table 2 Comparison between experimental and numerical simulation results

高度/m	试验风速/(m/s)	模拟风速/(m/s)	风速误差/%	试验水平风速加速比	CFD水平风速加速比	水平风速加速比误差/%
30	7.13	6.95	2.48	1.090	1.050	3.72
60	7.12	7.10	0.27	1.069	1.048	1.90
90	7.21	7.23	-0.39	1.060	1.045	1.38
120	7.25	7.35	-1.47	1.054	1.042	1.10
150	7.26	7.46	-2.79	1.033	1.040	-0.66
180	7.33	7.56	-3.34	1.026	1.038	-1.18
220	7.47	7.70	-3.12	1.031	1.036	-0.43
280	7.67	7.88	-2.77	1.029	1.033	-0.44
350	7.82	8.07	-3.20	1.028	1.031	-0.28
450	7.92	8.28	-4.59	1.028	1.028	0.01

为分析整体地形的风速分布特征,对如图 2(b)所示的 8 种不同风向角工况下的地形风速迹线进行分析,如图 9 所示。由图 9 可见,不同风向角下各山地区域的风速特性存在显著差异。受地形起伏及海拔高度的影响,各风向角工况下的最大风速均主要出现在山顶附近的 P1 测点区域。值得注意的是,在风向角为 180°的工况下(见图 9(e)),除 P1 测点所在山顶区域外,其余区域的风速相较于其他风向角工况均明显降低。结合图 5 中不同测点在 180°风向角下的水平风速加速比结果可知,其数值大多小于或接近于 1,表明前方高大山体对来流风具有显著的阻挡和削弱作用。此外,如图 9(g)和图 9(h)所示,当风向角分别为 270°和 315°时, #19 号光伏方阵安装区域(P10 测点附近)出现相对较大的风速值。该现象与图 5 中对应测点水平风速加速比结果相一致,进一步验证了上述分析结论的正确性和合理性。

利用风洞试验数据对 CFD 数值分析结果的准确性进行验证,同时基于 CFD 分析结果对风洞试验中测点布置的合理性进行反向验证。在光伏项目工程设计中,通常以距地形表面 10 m 高度处的水平风速加速比作为重要参考指标。基于 CFD 数值模拟结果,对典型测点位置处距地形表面 10 m 高度的水平风速加速比进行统计汇总,其结果见表 3。由表 3 可知,在不同风向角下,位于山顶区域的 P1 测点在 10 m 高度处的水平风速加速比均显著大于 1;其中,在风向角为 180°时,该测点处的水平风速加速比达到最大值,约为 1.35。相比之下,光伏方阵所在区域的 P6~P10 测点在 10 m 高度处的水平风速加速比整体小于 1.2。

2.5 水平风脉动值分析

针对复杂地形的气流特性,通过多个观测点获取水平风速的瞬时波动数据,计算得到各测点的湍

流强度,以此分析复杂地形对风脉动特性的影响规律。水平向湍流度是量化风脉动强弱的核心指标,其表达式如式 5 所示。

$$I(z)=\frac{\sigma(z)}{\bar{V}(z)}$$

(5)

式中: $\sigma(z)$ 为测点水平向风速的标准差; $\bar{V}(z)$ 为测点的水平向平均风速。

依据光伏方阵安装区域及试验数据结果,3 个典型测点不同风向角下的湍流度与平地来流湍流度对比结果如图 10 所示。由图 10 可见,不同测点在复杂山地地形影响下的湍流特性存在显著差异。具体而言,山顶区域湍流度变化幅度较小,而局部低洼或地形突变区域在特定风向条件下存在湍流增强现象,该规律与王薇嘉^[28]对相关复杂微地形研究结论一致。如图 10(a)所示, P1 测点(山顶位置)不同高度位置处实际湍流度整体围绕平地来流湍流度曲线波动,且湍流度的变化幅度大都小于 0.02。结合试验结果可以发现,山顶区域的地形效应主要体现在平均风速的加速作用上,而对脉动风强度的影响相对有限,地形并未显著增强该位置的湍流发展水平。如图 10(b)所示,在 P6 测点,当风向角为 225°时,近地面高度约 30 m 处的湍流度明显高于平地来流湍流度。该现象主要源于 P6 测点所在位置处于局部低洼且地形起伏较为复杂的区域,在特定风向条件下易诱发分离流和再附着流^[28],从而导致湍流强度显著增强。然而,随着高度的增加,当测点高度超过约 120 m 后,湍流度受地形影响的程度迅速减弱,逐渐趋近于平地来流特性。如图 10(c)所示, P10 测点整体湍流度水平普遍低于平地来流湍流度,表明该位置在多数风向条件下受地形扰动较弱。仅在风向角为 225°且高度低于 150 m 时,测点处湍流度明显高于平地来流湍流度,说明在特定风向与高度条件的耦合作用下,局部地形仍

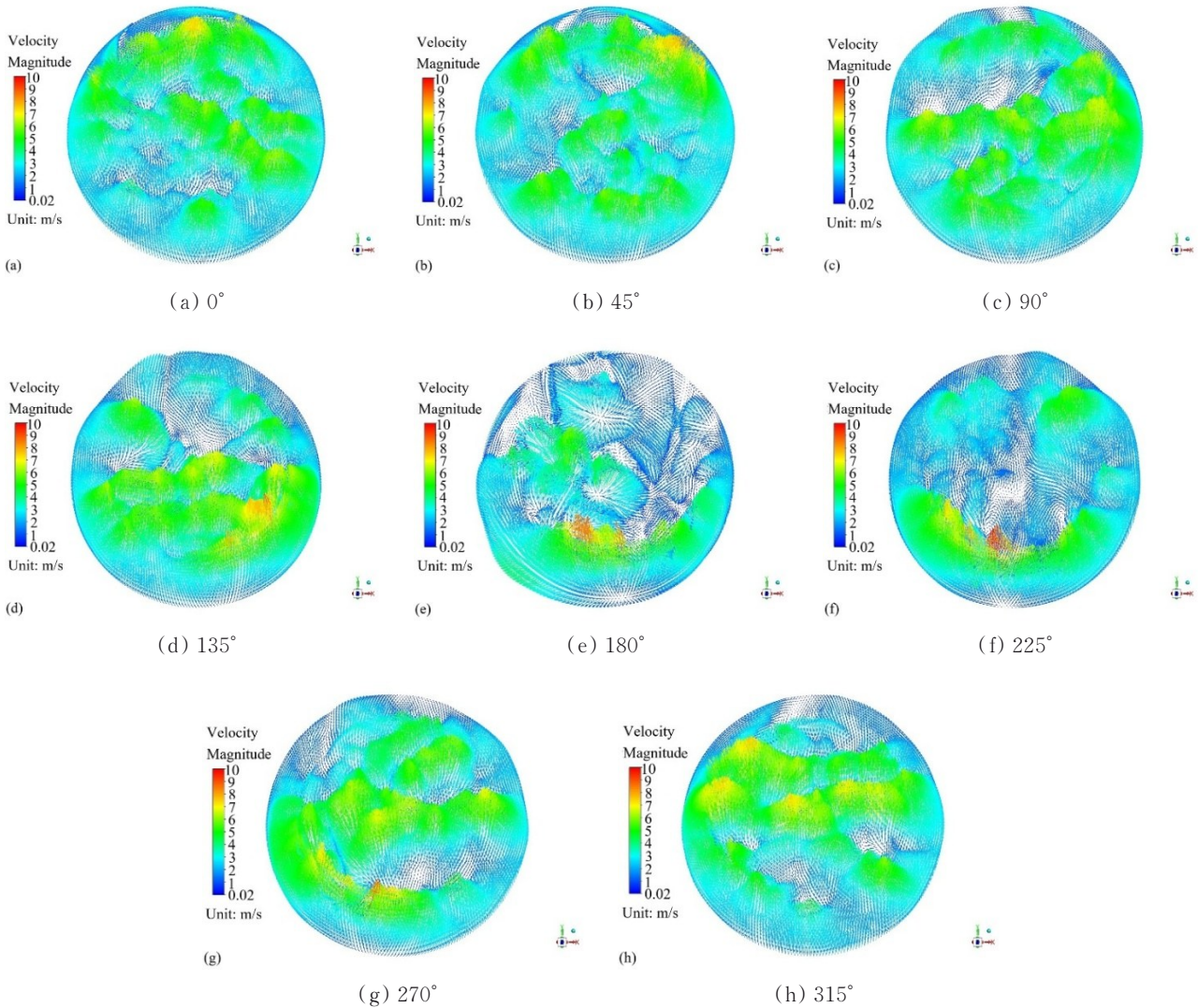


图9 不同风向角下全地形风速迹线分布图

Fig.9 Distribution of wind speed streamlines over the full terrain under different wind direction angles

表3 典型测点位置 10 m 高度处水平风速加速比

Table 3 Horizontal wind speed-up ratio at 10 m height at typical measurement locations

测点	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
P1	1.22	1.25	1.15	1.26	1.35	1.23	1.06	1.21
P6	0.82	0.82	1.00	0.85	0.64	0.41	1.00	0.77
P7	1.01	0.80	0.70	0.76	0.51	0.47	0.72	0.74
P8	0.92	1.00	1.01	0.81	0.81	0.75	1.13	0.97
P9	0.98	0.76	0.91	1.05	0.90	0.61	0.85	1.10
P10	1.03	0.97	1.13	1.17	1.02	0.68	1.14	1.17

可能对湍流度产生放大效应。综合分析表明,复杂山地光伏场址中湍流度的空间分布具有显著的地形依赖性和风向敏感性。山顶区域以平均风速加速效应为主,湍流增强效应相对有限;局部低洼及地形起伏复杂区域在特定风向条件下易出现显著的湍流放大;而相对平缓区域整体湍流水平较低,但在极端风向条件下仍需加以关注。因此,在复杂山地条件下开展光伏支架结构抗风设计时,应结合

典型地形分区特征及主导风向,对湍流度参数进行差异化取值,以在满足结构安全性要求的同时兼顾工程经济性。

2.6 水平风特性讨论

水平风速加速比结果与李正良等^[9]及沈国辉等^[10]关于复杂山地山顶区域存在显著加速效应的结论一致,即山顶位置加速比显著大于1,且随高度增加逐渐减弱。同时,研究发现不同风向角下加速效应存在明显差异,这与Ren等^[19]关于复杂地形三维耦合作用影响风速分布的结论吻合。

对比图5和图10发现,针对225°风向条件下光伏方阵区域测点出现“水平风速加速比相对较小而湍流度较高”的特征。结合图5、图9及图10结果分析可知,该特征与复杂地形诱导的分离-再附着流动结构密切相关^[29]。结合式(5)可知,所采用的湍流度定义反映的是速度脉动相对于平均风速的相对强度,而非脉动速度的绝对幅值。因此,在地形遮

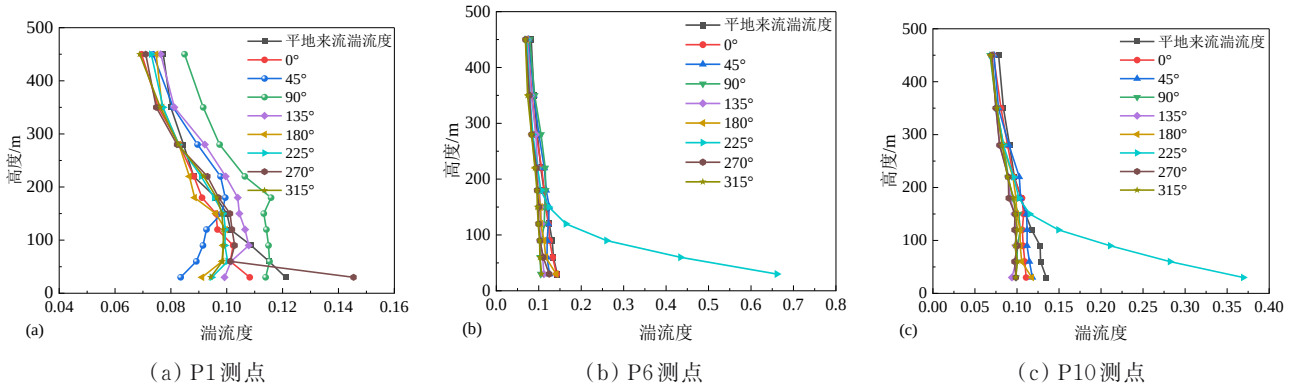


图 10 不同测点位置湍流度对比

Fig.10 Comparison of turbulence intensity at different measurement locations

挡作用下,当平均风速降低而脉动分量未同步减小时,湍流度将相对升高。从数学关系上看,“加速比降低而湍流度升高”并不存在物理矛盾。

根据图 2 地形剖面及图 9 的 CFD 流线分布,在 225°风向下流首先经过上游较高山体与复杂坡面区域,形成明显的遮挡效应与动量损失,使 P6~P10 测点 30 m 高度范围内平均风速显著降低(加速比最低约 0.40)。Jackson 等^[30]指出,典型山地流动中山顶迎风侧通常出现流动加速,而背风侧则形成明显的动量亏损区。气流越过山脊后易发生边界层分离,在背风坡区域形成剪切层与大尺度涡旋结构,并在下游产生再附着过程。这一机制已在 Askervein Hill Project 实测研究^[31]中得到验证,其结果显示背风坡区域平均风速降低但湍流度显著升高。此外,Tampieri 等^[32]也指出,复杂地形条件下湍流增强主要来源于剪切层不稳定以及分离涡旋结构的发展,而并非由平均风速水平直接决定。

近年的数值模拟与风洞研究亦表明^[33-36],复杂地形条件下分离区与再附着区的湍流结构明显不同于迎风加速区,低平均风速区往往伴随较强湍流发展。因此,225°风向下 P6 测点呈现“加速比最小而近地层湍流度最高”的特征,本质上反映了上游地形遮挡、流动分离及再附着共同作用形成的动量损失区与剪切增强区结构特征,属于复杂山地流动的合理物理响应。

3 复杂山体的竖向风研究

3.1 竖向风速占比定义

为量化复杂地形对气流竖向扰动的相对强度,采用竖向风速占比对其描述,具体表达式如式(6)所示。

$$S_w(z) = \frac{V_w(z)}{V_0(z)} \quad (6)$$

式中: $V_w(z)$ 为山体上 z 高度处实测的竖向平均风

速值; $V_0(z)$ 为来流在对应高度处的平均风速。正值表示风向竖直向上,负值代表风竖直向下。

3.2 典型测点位置竖向风速占比分析

图 11 展示了 #19 号光伏方阵区域和在高点位置不同风向角下不同高度处竖向风速占比。结果表明,不同测点竖向风速占比绝对值均小于 0.4,且不同测点在大部分风向角下的风速朝下。不同测点竖向风速占比绝对值随高度增加均呈现变小趋势,在高度达到 350 m 时趋于稳定数值。

如图 11(a)所示,位于山顶位置的 P1 测点竖向风速整体较小,在所有风向角条件下其竖向风速占比均处于较低水平。不同风向角对应曲线分布较为集中,表明该测点竖向风速受风向角变化的影响不敏感,整体以向下的竖向气流为主。仅在风向角为 90°和 135°时出现向上的竖向风速,其余风向角下均表现为下沉气流。其中,当风向角为 315°时, P1 测点在 30 m 高度处的竖向风速占比绝对值达到最大,约为 0.2。总体而言, P1 测点所在的山顶地形对气流竖向扰动相对强度较弱。图 11(b)~(f)展示了光伏安装区域内 P6~P10 测点的竖向风速占比变化特征。综合分析可知,不同测点在各风向角条件下均呈现出随高度变化的共同特征,即竖向风速整体幅值较小,主要集中于中低高度范围,而在高空区域(大于 350 m)逐渐趋于收敛,表明地形对气流竖向扰动的影响随高度增加而减弱。然而,不同测点位置之间仍存在显著差异:图 11(b)、(d)、(e)和(f)中竖向风速占比以负值为主,说明这些测点以下沉气流占主导,风向角影响相对有限;而图 11(c)中竖向风速正负变化更为复杂,部分风向角下在近地层或中层高度出现明显的正竖向风速,其占比幅值及曲线离散程度显著增大,反映出更强的风向角敏感性和地形诱导的抬升效应。其中,当风向角为 135°时, P7 测点位置竖向风速占比绝对值达到最大,约为 0.4。结合图 2(a)的地形特征可知, P7 测点位于

山体模型山腰处,且该区域存在局部坡向突变。在 135° 来流条件下,气流沿迎风坡上升过程中受坡度变化及侧向地形约束影响,产生明显的三维绕流与抬升效应,导致水平动量向竖向动量转化,从而显著增强竖向风速分量。同时,局部地形突变可能诱导气流分离与再附着,使流场三维扰动增强并提高垂直速度脉动。这一现象与既有复杂地形风场研

究中的结论具有一致性,即复杂坡面和局部地形突变往往会显著增强气流的三维性和垂直速度分量^[10, 37-38]。总体而言,复杂地形条件下竖向风速虽整体较小,但在特定风向角和高度范围内仍可能产生明显的抬升或下沉效应,工程分析中需对此予以充分关注。

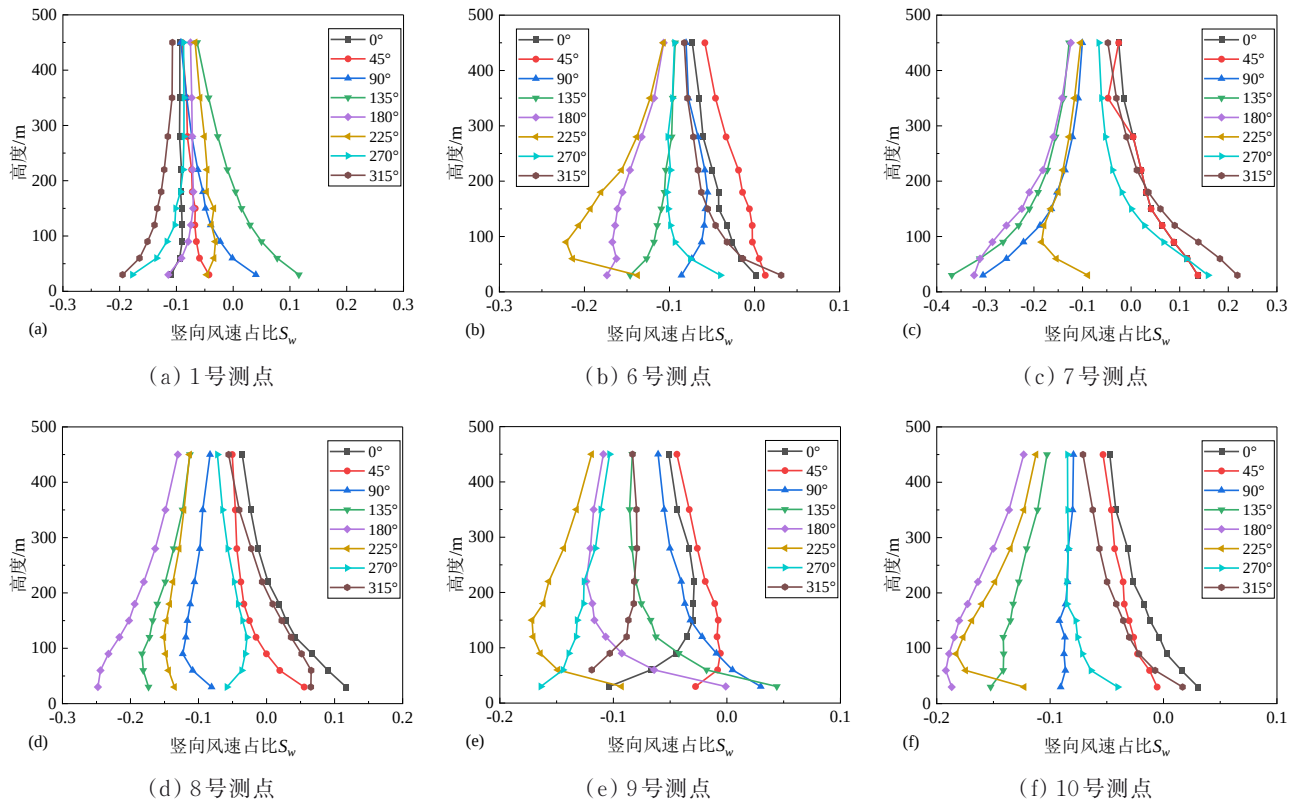


图 11 不同测点竖向风速占比

Fig.11 Ratio of vertical wind speed to total wind speed at different measurement points

3.3 竖向风速占比研究的讨论与建议

竖向风速整体占比较小,但在山腰及坡向突变区域存在明显抬升或下沉气流,这与沈国辉等^[10]关于复杂山体三维风场中存在局部显著竖向分量的研究结果相符。

从工程设计角度进一步评价其实际影响,有必要将竖向风速分量转化为对应的荷载效应,并与水平风荷载进行量级对比分析。根据风荷载基本计算关系,风压与风速平方成正比。当竖向风速与水平风速之比为 α 时,其对应竖向风荷载约为水平风荷载的 α^2 量级。结合风洞试验数据分析结果可知,在风向角为 270° 工况下,P7测点30 m高度处的竖向风速占比达到最大值,约为40%,对应产生的竖向风荷载约为水平风荷载的16%。除该测点在 270° 风向角工况外,在所关注的#19号光伏方阵范围内,其余测点在不同风向角下30 m高度处竖向风速占比最大值约为20%,对应荷载效应约为水平风

荷载的4%。由此可见,在多数区域内竖向风速所产生的附加荷载相对有限,但在特定风向及局部地形条件下,其影响不容忽视。

基于复杂山地地形下竖向风速特征的系统分析,提出如下工程设计建议:

1) 山顶及开阔高空区域竖向风速相对较小。位于山顶或地形起伏较弱区域的P1测点竖向风速整体较小,不同风向角下曲线分布集中,高空区域随高度增加逐渐趋于收敛,表明地形对竖向风的诱导作用随高度显著减弱。

2) 山腰及局部地形突变区域需重点关注竖向风效应。研究表明,相较于山顶位置,山腰及受局部地形起伏影响显著的测点(如P7)竖向风速占比幅值明显增大,部分风向角下竖向风速占比绝对值可达约0.4。在迎风方向受爬升效应影响,易形成较强的上升气流;在背风方向则以下沉气流为主,竖向风速正负交替出现,表明该区域气流竖向

结构复杂,应在结构设计中考虑竖向风的不利组合工况。

3)山脚及坡脚区域存在不可忽略的竖向风速分量。分析结果显示,山脚及近地层区域在部分风向角下仍存在一定幅值的竖向风速,占比虽整体小于山腰区域,但迎风面以正竖向风速为主、背风面以下沉气流为主,其竖向扰动主要集中于中低高度范围。在相关结构设计中不宜简单忽略竖向风作用。

4)竖向风速对光伏支架及附属构件的受力与响应具有潜在影响。尽管整体竖向风速幅值小于水平风速,但在特定风向角和高度范围内(如风向角为 270° ,P7测点30 m高度),竖向风速的抬升或下沉效应可能对光伏支架体系的竖向内力分布、构件稳定性及局部连接受力产生影响。尤其在类似风向角敏感区域,应在风荷载取值、结构安全校核及构造设计中适当考虑竖向风速的不利影响。

后续研究需选取典型光伏支架结构模型,结合实测风速数据计算竖向风速所产生的附加风荷载,并进一步分析其对关键构件内力分布及支座反力响应的影响程度。

4 结论

针对光伏项目场址复杂山地地形开展了风洞试验与CFD数值模拟研究,系统揭示了该类地形条件下近地层风场及风荷载的变化规律,获得了适用于光伏支撑结构抗风设计的关键风场参数与地形风速加速特征。主要研究结论如下:

1)系统揭示了复杂山地地形对水平风速加速效应的空间分布规律。基于风洞试验和CFD分析结果,对不同风向角山顶、山腰、山脚等典型地形位置的水平风速加速比进行了系统分析。结果表明,山顶迎风区域受整体地形抬升作用控制,普遍形成明显的风速加速区,而山腰坡度突变区域在特定风向条件下亦可能产生局部加速带。

2)明确了现行规范在复杂山地光伏工程中的适用性特征。通过与多国规范推荐值对比发现,各规范设计值在迎风工况下整体偏于保守,其中中国规范保守度较高,美国规范与试验结果吻合度相对较好。在满足结构安全性的前提下,复杂山地光伏支架结构的水平风速加速比设计值存在一定优化空间。

3)揭示了复杂山地条件下湍流特性与竖向风速的变化规律。山顶区域湍流度变化较小,地形主要影响平均风速;山腰及局部地形突变区域在特定风向与高度条件下易出现湍流增强现象,表明地形

形态是控制局部流场结构的重要因素。

4)提出了复杂山地光伏支架结构抗风设计建议。山顶区域应重点考虑水平风速放大效应并提高安全裕度;山脚及平缓区域可合理弱化加速影响;局部突起及不规则地形区域应作为重点控制部位;在风向敏感区域的结构设计中宜适当考虑竖向风速的潜在影响。

参考文献

- [1] 陈洪胜. 复杂地形风电场风资源评估精度提升研究[J]. 能源与节能, 2019(4): 63-64, 68.
Chen H S. Study on accuracy improvement of wind resource assessment in wind farms of complex terrain[J]. Energy and Conservation, 2019(4): 63-64, 68. (in Chinese)
- [2] Huang G Q, Cheng X, Peng L L, et al. Aerodynamic shape of transition curve for truncated mountainous terrain model in wind field simulation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 178: 80-90.
- [3] Singh J, Alam J M. Large-eddy simulation of utility-scale wind farm sited over complex terrain[J]. Energies, 2023, 16(16): 5941.
- [4] 张宏杰, 赵金飞, 蔡达章, 等. 垭口地貌要素对风速分布规律影响的风洞试验研究[J]. 实验流体力学, 2014, 28(4): 25-30.
Zhang H J, Zhao J F, Cai D Z, et al. Wind tunnel test on the influence of col features on wind speed distribution [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28 (4): 25-30. (in Chinese)
- [5] Deng Y C, Li S Y, Chen Z Q. Experimental investigation on wake-induced vibrations of the hangers of suspension bridges based on three-dimensional elastic test model [J]. Engineering Structures, 2021, 234: 111985.
- [6] 樊铁强, 李路, 刘泉池. 复杂地形条件下光伏电站支架动态抗风性能优化技术研究[J]. 电力设备管理, 2025 (5): 73-75.
Fan T Q, Li L, Liu Q C. Research on the optimization technology of dynamic wind resistance performance of photovoltaic power station bracket under complex terrain conditions[J]. Electric Power Equipment Management, 2025(5): 73-75. (in Chinese)
- [7] 胡伟成, 杨庆山, 张建. 多国规范山地风速地形修正系数对比研究[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 203-211.
Hu W C, Yang Q S, Zhang J. Comparative study on wind topographic factor of hilly terrain by different codes and standards[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 203-211. (in Chinese)
- [8] Lubitz W D, White B R. Wind-tunnel and field investigation of the effect of local wind direction on speed-up over

- hills[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(8): 639-661.
- [9] 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, 198.
Li Z L, Wei Q K, Sun Y. Experimental research on amplitude characteristics of complex hilly terrain wind field[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 184-191, 198. (in Chinese)
- [10] 沈国辉, 翁文涛, 王轶文, 等. 某复杂山体的三维风场特征研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 75-80.
Shen G H, Weng W T, Wang Y W, et al. A study on three-dimensional wind field characteristics of a complex hill[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 75-80. (in Chinese)
- [11] 张会阳, 江鹏, 钱权, 等. 基于RANS的三维山地风场数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊 2): 2014-2020.
Zhang H Y, Jiang P, Qian Q, et al. Study of numerical simulation for three-dimensional mountain wind field based on RANS[J]. Building Structure, 2022, 52(Sup 2): 2014-2020. (in Chinese)
- [12] 郭文星. 复杂山地地形风场CFD多尺度数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Guo W X. CFD multi-scale simulation of wind flow over hilly terrain[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] 李燕. Global Mapper在测绘生产中的应用[J]. 经纬天地, 2023(1): 63-65.
Li Y. Application of global mapper in surveying and mapping production[J]. Survey World, 2023(1): 63-65. (in Chinese)
- [14] 范信凌, 张东栋, 张斌, 等. 山地大型柔性支架光伏阵列风场特性的数值模拟研究[J]. 太阳能, 2025(3): 45-55.
Fan X L, Zhang D D, Zhang B, et al. Study on numerical simulation of wind field characteristics of large-scale flexible bracket PV arrays in mountainous areas[J]. Solar Energy, 2025(3): 45-55. (in Chinese)
- [15] 肖斌, 徐翔, 田永进, 等. 基于GIS+Fluent的复杂山体柔性光伏工程风速修正系数研究[J]. 西北水电, 2025(1): 108-116.
Xiao B, Xu X, Tian Y J, et al. Study on the wind speed correction coefficient of flexible photovoltaic projects in complex mountainous areas based on GIS+Fluent[J]. Northwest Hydropower, 2025(1): 108-116. (in Chinese)
- [16] 马素慧. 光伏组件阵列风载数值模拟及风洞试验研究[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2021.
Ma S H. Numerical simulation and wind tunnel test of photovoltaic module array[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2021. (in Chinese)
- [17] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S].
- [18] Neff D E, Meroney R N. Wind-tunnel modeling of hill and vegetation influence on wind power availability[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 335-343.
- [19] Ren H H, Laima S, Chen W L, et al. Numerical simulation and prediction of spatial wind field under complex terrain[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 180: 49-65.
- [20] Jin D C, Zhou Q, Han B. Effects of slope ratios on wind field over two-dimensional continuous smooth ridges using large eddy simulations[J]. Advances in Wind Engineering, 2025, 2(1): 100040.
- [21] Blocken B, van der Hout A, Dekker J, et al. CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147: 43-57.
- [22] 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, 2014.
Yao D. Research on characteristics of wind field on hilly terrain and its wind load effect on lattice transmission towers[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [23] NF EN 1991-1-4/A1-2010 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions[S].
- [24] AS/NZS 1170.2-2011 Structural design actions - Part 2: Wind actions[S].
- [25] ASCE/SEI 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures[S].
- [26] AIJ-2019 Recommendations for Loads on Buildings (2015) [M]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2019.
- [27] 闫姝, 曾崇济, 王晓东, 等. 多山地地形风场流动数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 77-83.
Yan S, Zeng C J, Wang X D, et al. Numerical simulation of wind farm flow on multi-hill terrain[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 77-83. (in Chinese)
- [28] 王薇嘉. 复杂微地形的风场特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
Wang W J. Investigation of wind field characteristics in complex micro-terrain[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022. (in Chinese)
- [29] Simiu E, Yeo D. Wind effects on structures: modern structural design for wind[M]. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2019.
- [30] Jackson P S, Hunt J. Turbulent wind flow over a low hill [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975, 101(430): 929-955.

[31] Taylor P A, Teunissen H W. The Askervein Hill project: overview and background data[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1987, 39(1/2): 15-39.

[32] Tampieri F, Mammarella I, Maurizi A. Turbulence in complex terrain[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 109(1): 85-97.

[33] Ma G L, Tian L L, Song Y L, et al. Effects of turbulence modeling on the simulation of wind flow over typical complex terrains[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(23): 11438.

[34] Chen X Y, Ishihara T. Numerical study of turbulent flows over complex terrain using an unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes model with a new method for turbulent inflow generation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2025, 257: 105991.

[35] Yamaguchi A, Tavana A, Ishihara T. Assessment of wind over complex terrain considering the effects of topography, atmospheric stability and turbine wakes[J]. *Atmosphere*, 2024, 15(6): 723.

[36] Zhou T, Ishihara T. LES study of turbulent flow fields over a three-dimensional steep hill considering the effects of thermal stratification[J]. *Computers & Fluids*, 2025, 288: 106521.

[37] Finnigan J J, Belcher S E. Flow over a hill covered with a plant canopy[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, 130(596): 1-29.

[38] Wood N. Wind flow over complex terrain: a historical perspective and the prospect for large-eddy modelling[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96(1/2): 11-32.

(编辑 XXX)