

不同坡度地形下光伏组件风荷载特性研究

豆红强¹, 杨剑新¹, 李 如², 王龙威²

(1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福州 350108; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

摘 要: 为揭示地形坡度对光伏组件风压分布形式及风荷载体型系数的影响, 利用 FLUENT 流体仿真软件, 采用雷诺时均方法和剪切应力传输模型湍流模型, 开展不同坡度地形下不同光伏组件倾角、不同风向角工况的光伏组件风压分布规律及其风荷载体型系数研究。结果表明: 不同坡度地形下风向角和安装倾角均对光伏组件所受风荷载大小具有显著影响; 由于地形坡度的存在会导致风产生绕流效应, 但随着柱高的增加绕流效应将逐渐减弱; 在不同坡度及不同光伏组件安装倾角条件下, 单组串光伏组件体型系数均大于光伏阵列组件体型系数; 光伏阵列组件的遮挡效应导致第 2 行光伏组件的体型系数最大衰减达 70%, 第 3 行光伏组件的体型系数最大衰减达 66%。然而, 坡度的存在显著削弱了遮挡效应, 最大衰减幅度可减少 45%。

关键词: 坡度; 数值模拟; 风压; 光伏组件; 体型系数; 遮挡效应

中图分类号: TK513.5

文献标志码: A

0 引 言

随着全球能源需求的不断增长和对可再生能源的日益关注, 陆地光伏发电技术作为清洁、可持续的能源解决方案, 凭借其灵活安装、广泛适应性及低运营成本, 已成为主流选择。风荷载作为陆地光伏组件设计的控制荷载, 其大小和分布形式直接影响支架设计和材料选取。为此, 国内外众多学者开展了不同设计参数(如风向^[1-3]、光伏组件倾斜角^[4-6]以及遮挡物^[7-8]等)对太阳能光伏组件风荷载的影响研究。然而, 现有研究多集中于平坦地形, 随着土地资源日渐紧张, 陆地光伏逐渐向山地丘陵等复杂地形发展, 而地形起伏会引起风场变化, 使光伏组件的风荷载特性发生变化。已有研究表明, 地形坡度对风速剖面、风向和风湍流等风场特征有重要影响^[9-11]。在斜坡地形下风流动的加速效应、分离现象及湍流强度变化均会直接影响光伏组件的受力分布^[12-14]。对于不同坡度的地形, 光伏组件的安装角度与地形坡度相互作用也将导致光伏组件所受风荷载的非线性变化。因此, 传统针对平坦地形的风荷载计算方法可能不再适用, 尤其是目前各国规范未能充分考虑不同坡度地形对光伏组件风荷载分布形式的影响。

鉴于此, 深入研究不同坡度地形下光伏组件的风荷载特性, 对提高陆地光伏发电系统的安全性与耐久性至关重要。本文借助数值仿真手段, 分别针对单组串光伏组件和光伏阵列组件系统分析不同坡度地形对光伏组件风荷载特性与其

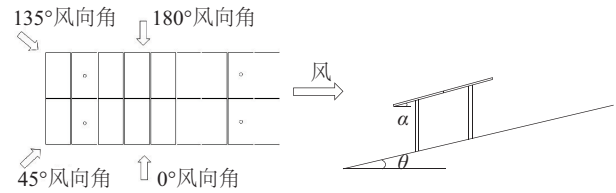
体型系数的影响, 以期复杂地形条件下光伏组件的设计和 optimization 提供科学依据。

1 数值模拟方法

1.1 计算工况

某大型光伏电站项目位于中国西南境内, 为高原山地地貌, 且拟建场址坡度相对较陡, 为 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 局部约达 30° 。该项目采用高度可调节的固定支架, 单组固定支架横向布置 2 行、纵向 9 块, 共计 18 块光伏双面组件。光伏组件采用 570 Wp 单晶硅双玻双面组件, 其尺寸为 $2278 \text{ mm} \times 1134 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 。此外, 每两个光伏组件间隔 20 mm 。图 1a 为单组串光伏组件布置示意图。为系统分析不同坡度地形下不同光伏组件倾角、不同风向角等工况下光伏组件的风压分布规律, 现制定如表 1 所示的计算工况。

由于风荷载具有不确定性和不均匀分布等特征, 为保证结构稳定性, 研究光伏阵列组件在各种工况下的风荷载特性是十分必要的。因此, 设计 3 行阵列, 行间距为 5 m 的光伏阵列, 在此基础上进行各种工况下的数值模拟, 如图 1b 所示。



a. 单组串光伏组件布置示意图

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(42007235)

通信作者: 豆红强(1987—), 男, 博士、副教授, 主要从事岩土与地质工程等方面的研究。dohq@fzu.edu.cn

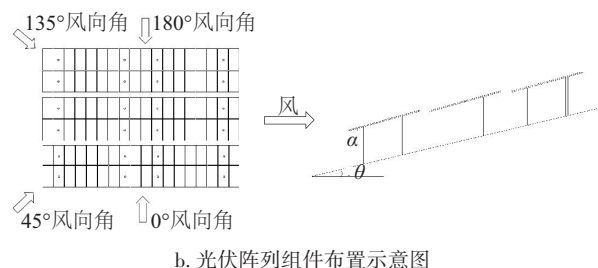


图1 单组串光伏组件布置及光伏阵列组件布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single string PV module arrangement and PV array module arrangement

表1 计算工况

Table 1 Working conditions of calculation

工况	坡度 $\theta/$ ($^{\circ}$)	光伏组件 倾角 $\alpha/$ ($^{\circ}$)	风向角/($^{\circ}$)	柱高 h/m
1	0	15,30,45,60	0,45,135,180	0.8,1.0,1.2,1.4
2	10	15,30,45,60	0,45,135,180	0.8,1.0,1.2,1.4
3	20	15,30,45,60	0,45,135,180	0.8,1.0,1.2,1.4
4	30	15,30,45,60	0,45,135,180	0.8,1.0,1.2,1.4

1.2 风场计算域设置与网格划分

一般来说,风场计算域高度的确定取决于建筑类型。高层建筑主要受侧向绕流影响,一般取模型高度的2~3倍;当迎风面高宽接近时,需取4倍以上;而由于较矮建筑受顶部绕流影响,通常取7~10倍^[15-16]。基于此,本文风场计算域的长、宽、高分别取15倍光伏组件顺风向长度、6倍光伏组件的宽度和10倍光伏组件的高度,并调整后,单组串光伏组件的风场计算域尺寸为150 m×60 m×40 m,光伏阵列组件模型的风场计算域则取180 m×70 m×40 m,且光伏组件模型的中心距入口边界1/3处。进一步的,采用阻塞率(即建筑物最大迎风面积与流域横截面面积比值)予以衡量。此时,单组串光伏组件模型的风场计算域阻塞率为2.45%,光伏阵列组件模型的风场计算域阻塞率为2.12%,均小于Baetke等^[17]在进行数值风洞计算时推荐的3%。图2即为计算模型及其网格划分示意图。

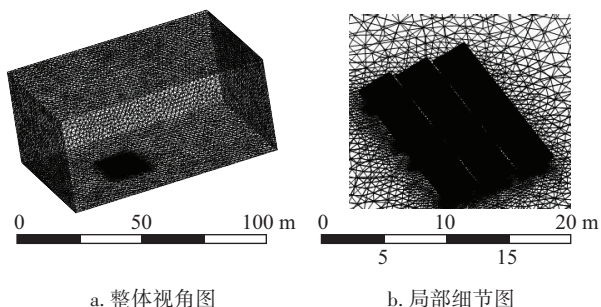


图2 光伏阵列组件模型网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PV array module model meshing

1.3 边界条件与参数设置

1) 依据中国气象数据网给出的西南地区最大风速数据,选取风速25 m/s,入口风速剖面采用中国现行规范中的指数型平均风速剖面,表达式为:

$$U_z = U_0(z/10)^n \quad (1)$$

式中: U_z ——大气边界层内任一高度的平均风速,m/s; U_0 ——参考高度平均风速,m/s; n ——地面粗糙度指数。

入口边界条件采用速度入口边界条件;出口边界条件采用自由出流边界条件,该边界条件属于完全发展流,其各物理量沿流向均不发生变化;计算域侧面及顶面设置为无滑移边界条件,即流固边界处速度法向分量和切向分量均为0;地面及光伏组件设置为无滑移壁面边界条件,即在不考虑流固耦合情况下,固体表面始终处于静止状态,壁面速度的3个坐标分量为 $u=v=w=0$ 。

2) 湍流模型采用SST $k-\omega$ 模型,特性设定通过湍动能参数 k 和耗散率参数 ε 实现,其表达式分别为:

$$k = \frac{3}{2}(u_0 I_u)^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{l} C_u^{(3/4)} k^{(3/4)} \quad (3)$$

式中: u_0 ——平均风速,m/s; I_u ——入口湍流强度; l ——入口湍流积分尺度,m; C_u ——模型常数,取0.09。

对 l 和 I_u 的取值,由于中国相关规范未给出规定值,故以日本现行规范为依据,选取Ⅱ类地貌,分别按式(4)和式(5)计算:

$$l = 100(z/30)^{(1/2)} \quad (4)$$

$$I_u = \begin{cases} 0.23, & z < z_b \\ 0.1(z/z_G)^{(-\beta-0.05)}, & z_b \leq z \leq z_G \end{cases} \quad (5)$$

式中: z_b ——风剖面起点高度,取5 m; z_G ——梯度高度,取350 m; β ——风速幂指数,取0.16。

1.4 风荷载体型系数的定义

风荷载体型系数由光伏组件受风面上所有测点处风压系数对该测点位置从属面积加权平均得到,风压系数和体型系数可用式(6)和式(7)表示:

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_s}{P_t - P_s} = \frac{P_{li} - P_{si}}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (6)$$

式中: C_{pi} ——第 i 测点风压系数; P_i ——第 i 测点下压力,Pa; P_s ——参考点高度远方来流处的静压,Pa; P_{li} ——第 i 测点净风压力,Pa; V ——来流参考高度平均风速,参考高度选取离地面10 m处,m/s; ρ ——空气密度,取值为1.225 kg/m³。

$$\mu_s = \frac{\sum C_{pi} A_i}{A} \quad (7)$$

式中: μ_s ——体型系数; A_i ——每个测点从属面积,m²;A——迎风面总面积,m²。

2 计算结果分析

2.1 不同坡度下单组串光伏组件风荷载特性

为研究坡度对光伏组件风压分布和体型系数的影响,固定光伏组件安装倾角为 15° , 设置坡度为 0° 和 30° , 在 0° 、 45° 、 135° 和 180° 风向角条件下对光伏组件进行数值模拟。图 3~图 6 分别为不同工况下单组串光伏组件风压分布云图, 其中 0° 和 45° 风向角光伏组件上表面为正压分布, 下表面为

负压分布, 135° 和 180° 风向角光伏组件风压分布则相反。

2.1.1 风向角为 0° 下坡度对光伏组件风荷载影响

由图 3a 和图 3b 可知, 在 0° 坡度(平坦地形)条件下, 光伏组件的风压大小随风向从下至上呈扇形递减。其中, 最大正压区域占光伏组件面积的 10%, 最大负压区域则达到 40%。当地形坡度达到 30° 坡度时(图 3c 和图 3d), 光伏组件上表面的最大正压区域明显向上扩展, 占光伏组件面积的比例增至 20%, 光伏组件下表面由于绕流效应影响, 最大负压区域减至 8%。

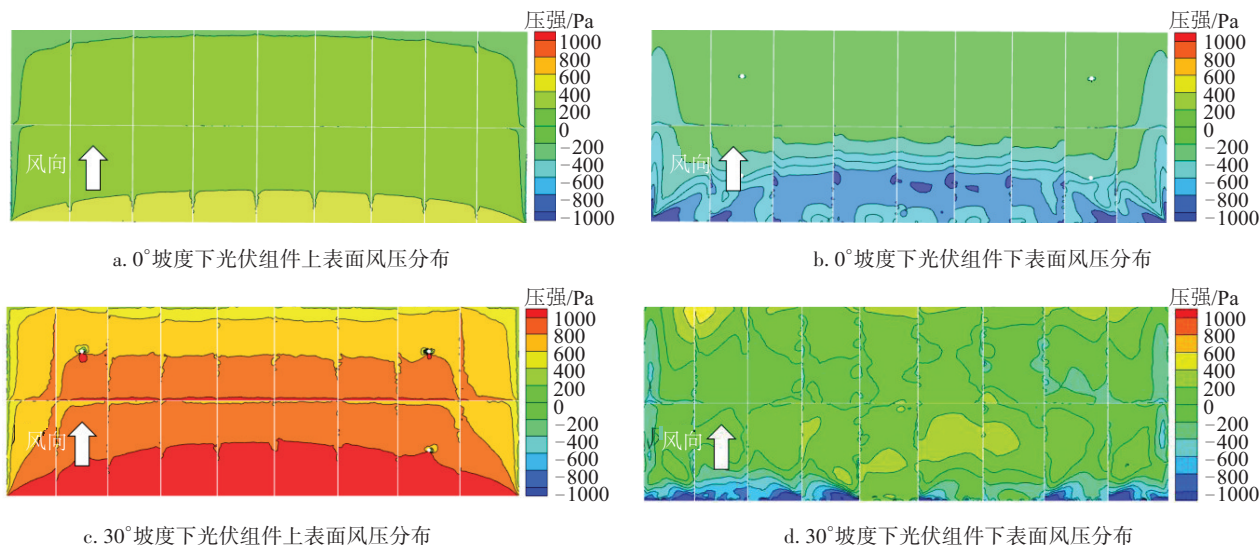


图3 不同坡度下 0° 风向角光伏组件上表面和下表面风压云图

Fig. 3 Wind pressure diagrams on upper and lower surfaces of PV modules with 0° wind angle at different slopes

2.1.2 风向角为 45° 下坡度对光伏组件风荷载影响

从图 4a 和图 4b 可见, 在 0° 坡度(平坦地形)条件下光伏组件的风压大小由左下至右上递减。此时, 最大正压区域仅占 3%, 而最大负压区域则占据 35% 的光伏组件面

积。在 30° 坡度条件下(图 4c 和图 4d), 最大正压区域向右上方扩展, 覆盖了光伏组件面积的 45%, 同时, 由于坡度地形的影响, 光伏组件下表面的最大负压区域出现减少现象。

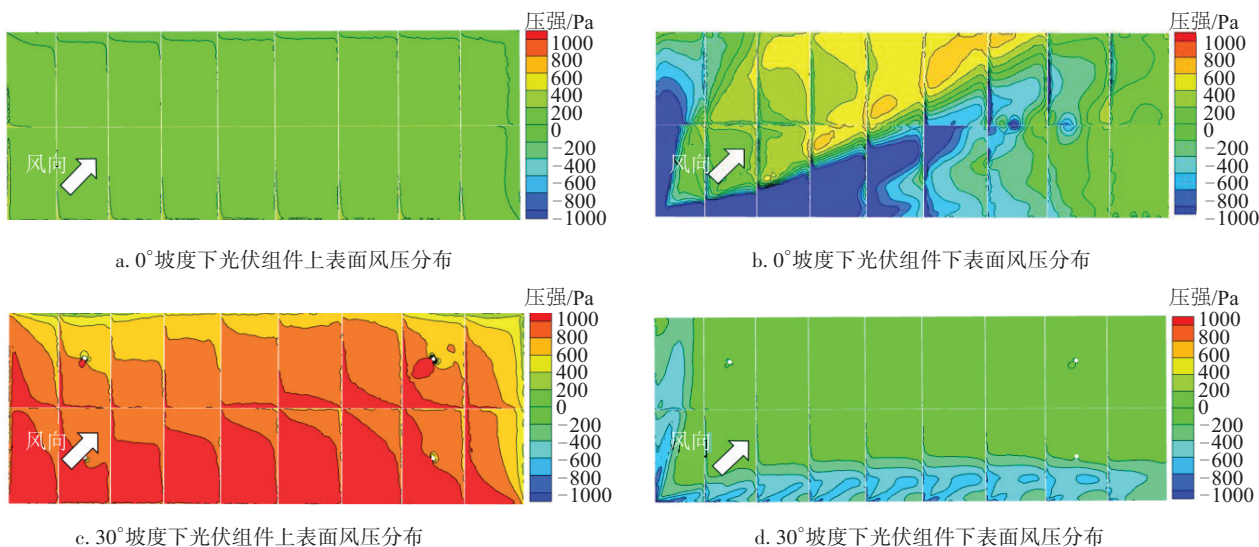


图4 不同坡度下 45° 风向角光伏组件上表面和下表面风压云图

Fig. 4 Wind pressure diagrams on upper and lower surfaces of PV modules with 45° wind angle at different slopes

2.1.3 风向角为 135° 与风向角为 180° 下坡度对光伏组件风荷载影响

风向角在 135° 和 180° 的条件下, 光伏组件的风压变化趋势与风向角为 0° 和 45° 时的风压分布表现出相似性, 如图 5 和图 6 所示。尤其注意的是, 相较其他风向角, 当风向角为

180° 时 (图 6d), 最大正压区域可扩展至光伏组件面积的 60%, 这一现象主要由于在 30° 坡度条件下有更多来流风直接接触光伏组件, 使得光伏组件有效迎风面积增加, 所以该区域最大正压范围显著增加。

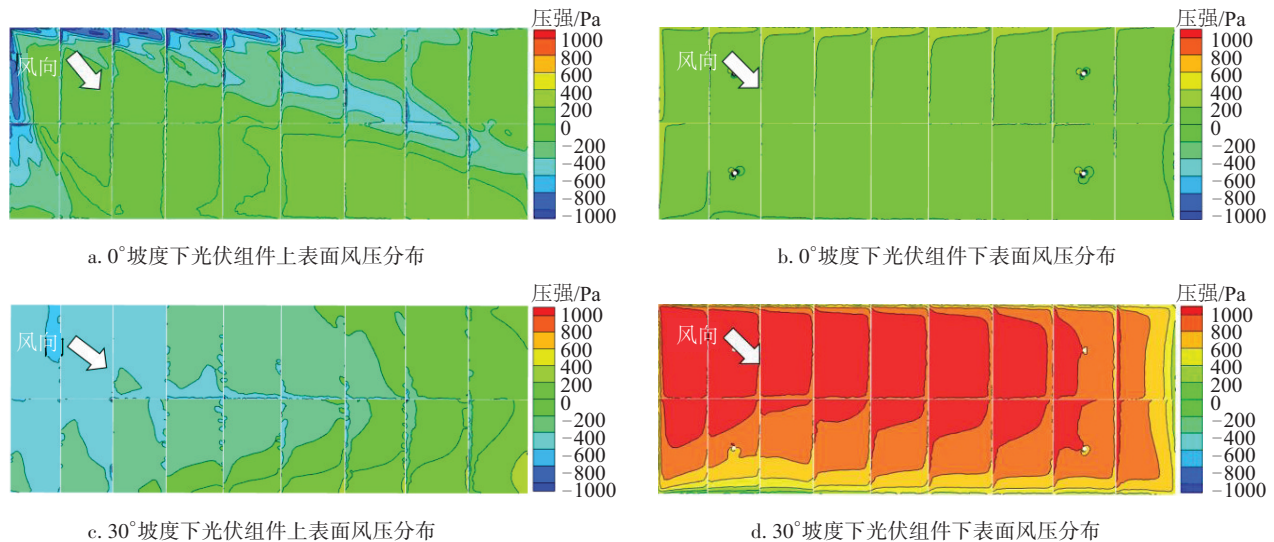


图 5 不同坡度下 135° 风向角光伏组件上表面和下表面风压云图

Fig. 5 Wind pressure diagrams on upper and lower surfaces of PV modules with 135° wind angle at different slopes

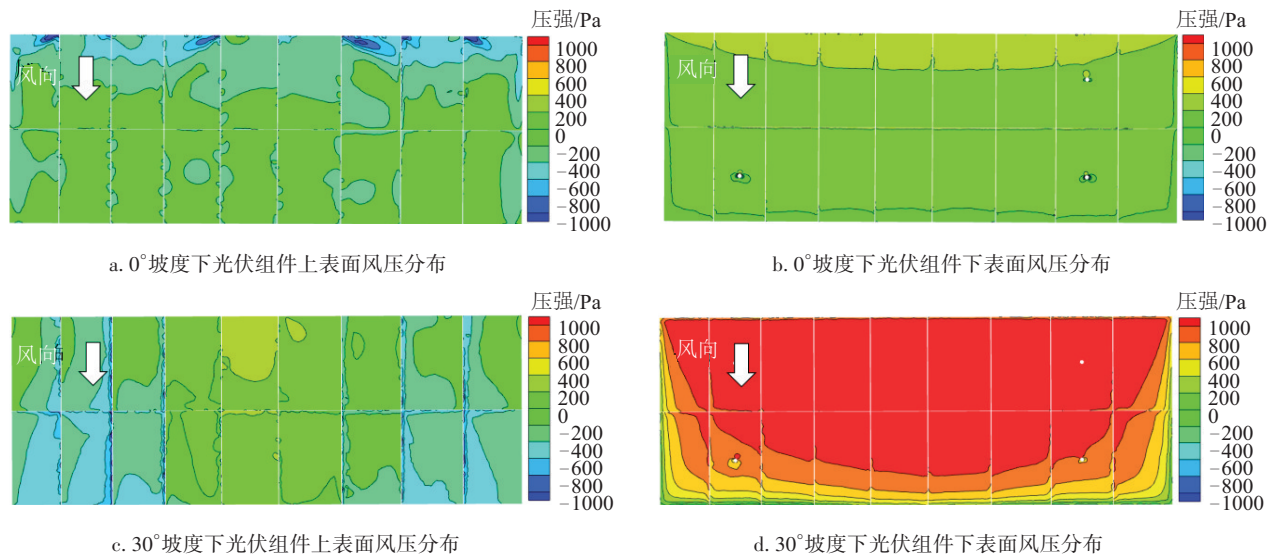


图 6 不同坡度下 180° 风向角光伏组件上表面和下表面风压云图

Fig. 6 Wind pressure diagrams on upper and lower surfaces of PV modules with 180° wind angle at different slopes

图 7 为 0° 坡度 (平地条件) 下各风向角光伏组件风速矢量图, 结合图 3~图 6 可看出, 来流风被光伏组件阻挡, 产生气流分离、扩散和再聚集, 导致光伏组件上下形成显著压力差, 背风面出现涡流并呈负压。相较于平地, 坡度地形改变风流方向, 增加光伏组件迎风面积, 使最大正压区域随坡度增大而增大。此外, 来流风在地形表面产生绕流效应对背风面产生反作用, 使得负压逐渐减小, 随坡度增加, 绕流效应愈加明显。

2.1.4 各风向角下坡度对光伏组件体型系数影响

《建筑结构荷载规范》^[18] (GB 50009—2012) 中规定低于 10 m 的 B 类地貌高度系数均为 1.0, 且在计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值风洞模拟中所有光伏组件网格均匀划分, 故数值模拟得到的风压系数即为体型系数。

图 8 为光伏组件安装倾角为 15° 条件下光伏组件体型系数变化趋势, 其中体型系数为正表示光伏组件受压力, 为负

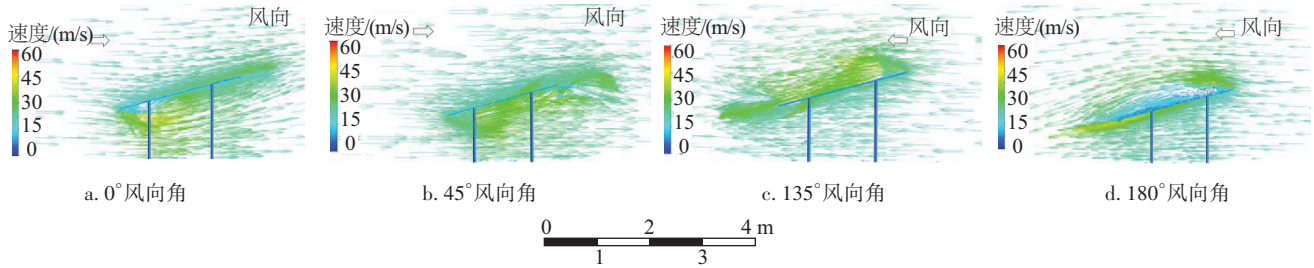


图7 坡度0°下各风向角光伏组件风速矢量图

Fig. 7 Vector plot of wind speed of PV modules in each wind direction angle at 0° of slope

则表示受吸力。由图8可知,当风向角从0°~45°变化时,体型系数随坡度增加呈线性递增趋势,变化范围为0.05~0.34。特别是坡度从20°增至30°过程中,体型系数增幅高达63%,表明随着坡度增大,光伏组件所承受的风荷载显著增加。

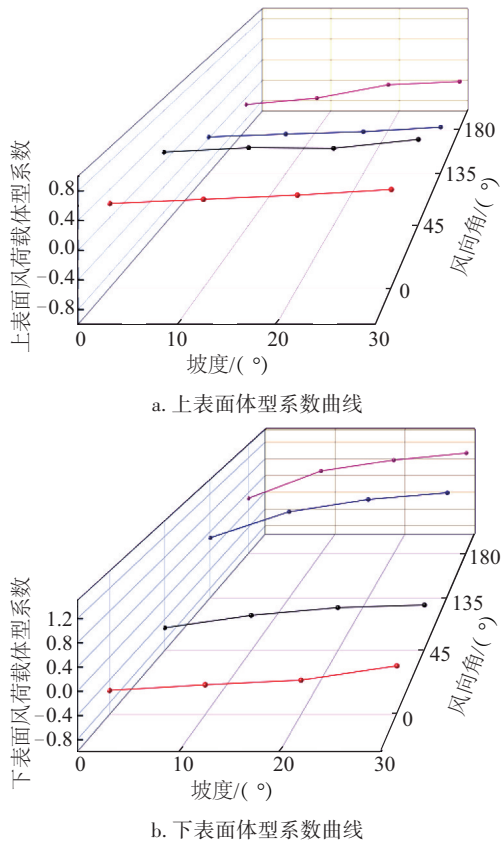


图8 不同坡度下各风向角光伏组件体型系数曲线

Fig. 8 Curves of PV module body shape coefficient for each wind direction angle under different slopes

在风向角从135°~180°变化时,光伏组件上下表面体型系数均随坡度增大呈线性增长。当风向角为180°时,上下表面体型系数绝对值最大,坡度从20°增至30°时,上下表面体型系数差值达1.40,在此条件下组件受损风险显著增加。

中国规范《建筑结构荷载规范》^[18](GB 50009—2012)、美国规范《建筑物及其他构筑物最小设计荷载》^[19](ASCE/SEI 7—10)和日本规范《光伏阵列荷载设计指南》^[20](JIS C8955—2017)均对平地工况下不同光伏组件倾角的风荷载体型系数

进行了规定,见表2。对比结果表明,模拟值小于规范取值,且规范较为保守。同时,3个国家规范均未明确规定坡地工况下的体型系数。数值模拟显示,当光伏组件安装倾角为15°、坡度为30°且风向角为180°时,最不利工况迎风面体型系数为1.31,超过美国和日本规范值,与中国规范取值接近。鉴于此,本文根据不同坡度下光伏组件数值模拟结合参考文献的相关实验所得结果,对最不利工况下的体型系数进行修正,见表3(其中 θ 表示坡度),实际工程中光伏组件在有坡度地形下设计时可以此参考。

表2 最不利风向角工况风荷载体型系数模拟值与规范对比

Table 2 Comparison of simulated values of wind load body shape factor with code under most unfavourable wind angle condition

		规范值			模拟值
		中国	美国	日本	
平地下光伏	组件倾角15°				
	迎风面	1.325	1.10	1.063	0.25
风荷载体型	背风面	-0.625	-1.10	-1.458	-0.58
系数 μ_s					

表3 最不利风向角工况下风荷载体型系数随坡度变化建议值

Table 3 Suggested value of shape coefficient of wind load with slope under most unfavorable wind direction

坡度/(°)	光伏组件上表面	光伏组件下表面
0~10	0.012 θ -0.52	0.063 θ +0.27
10~20	0.025 θ -0.65	0.025 θ +0.65
20~30	0.006 θ -0.27	0.016 θ +0.83

2.1.5 各安装倾角下坡度对光伏组件风荷载影响

2.1.4 节模拟得出180°为最不利风向角,故本节以风向角180°为例,探究各安装倾角下坡度对光伏组件风压分布及体型系数影响,15°、30°、45°和60°光伏组件安装倾角在不同坡度下风压分布如图9所示。

从图9可知,0°坡度(平坦地形)下,随着光伏组件安装倾角从15°增至60°,迎风面最大压力区域的范围扩大达90%。相比平地,在30°坡度条件下光伏组件迎风面高压区域增加,最大可达95%。背风区域呈负压状态,当光伏组件安装倾角低于30°时,背风面受绕流影响更大,随着坡度增加负压区域

减小达 70%。相比之下,光伏组件安装倾角大于 30°时,绕流效应减弱,随着坡度增加负压区域减小达 50%。说明坡度对

光伏组件在较小安装倾角时的受压范围影响显著,而对大安装倾角的影响相对较小。

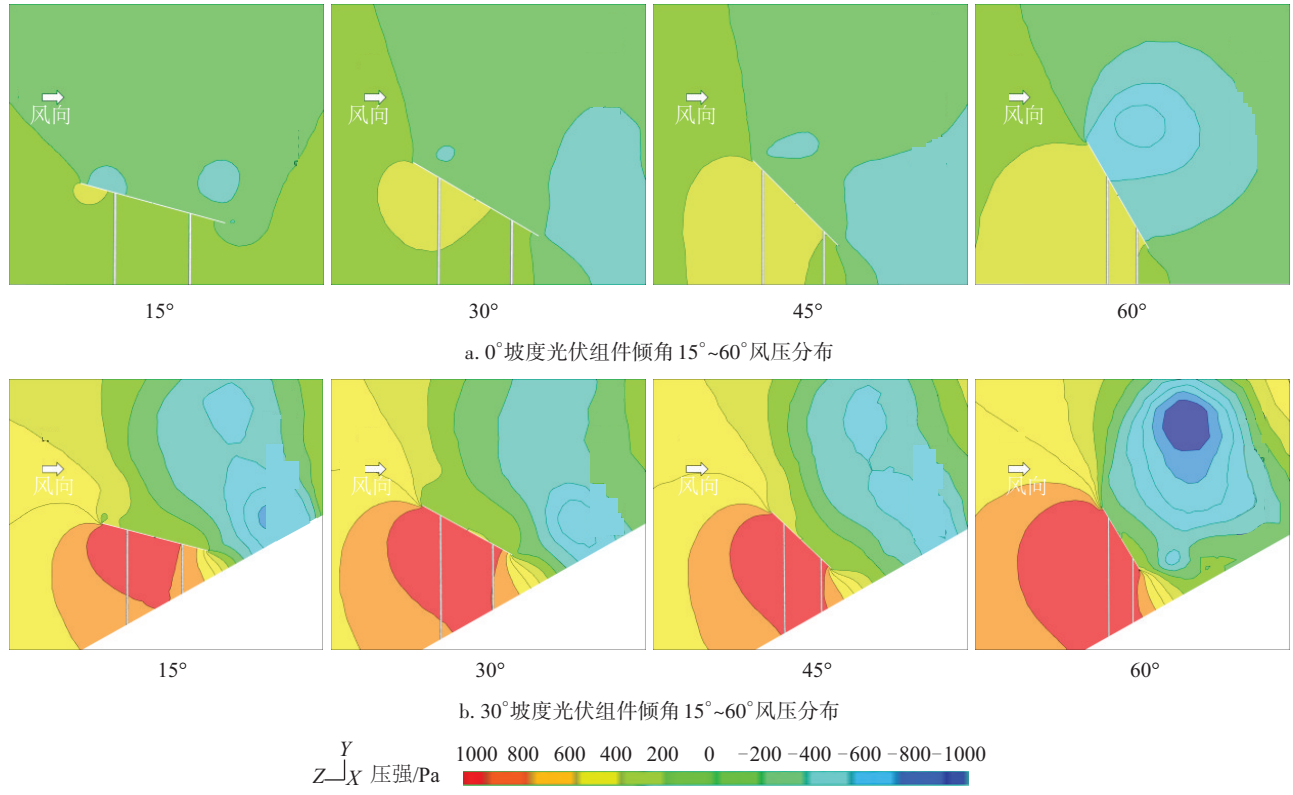


图9 不同坡度下光伏组件倾角 15°~60°风压云图

Fig. 9 Wind pressure diagrams of PV modules with inclination angles of 15°~60° at different slopes

2.1.6 各安装倾角下坡度对光伏组件体型系数影响

图 10 显示了不同坡度工况下光伏组件迎风面和背风面风荷载体型系数随安装倾角的变化趋势。结果表明,在相同坡度条件下,风荷载体型系数随着安装倾角的增加而增大,其中迎风面的体型系数范围为 0.30~1.31。同时,体型系数与坡度呈线性关系,尤其在 20°和 30°坡度条件下,迎风面和背风面的体型系数差值最大可达 1.87,易造成光伏组件破坏。

通过对比 CFD 模拟得到平地工况下光伏组件体型系数

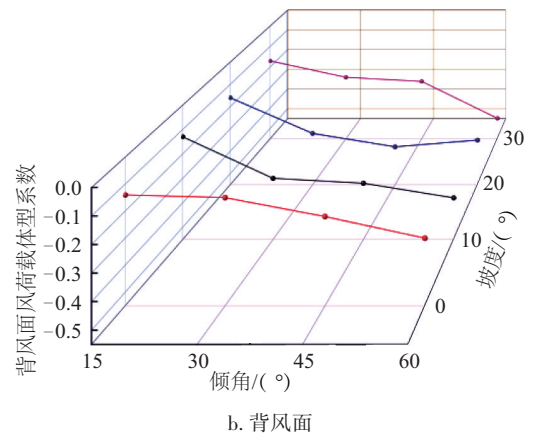
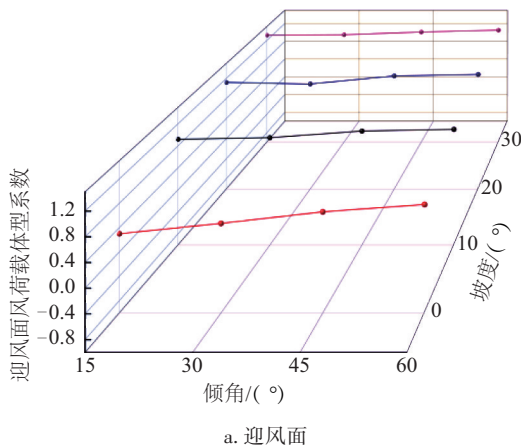


图 10 不同坡度下各倾角光伏组件体型系数曲线

Fig. 10 Body shape coefficient curves of PV modules with different slopes at each inclination angle

与各国规范中的体型系数值(图 11),发现模拟结果与规范的体型系数取值偏差较大,且各国规范给出的体型系数值相对保守。若依据中国荷载规范进行光伏支架设计,可能导致结构材料使用量显著增加。同时中国规范仅对平地工况下倾角为 30°及以下的光伏组件体型系数提供了具体取值。考虑到各国规范尚未对不同坡度地形下光伏组件各倾角体型系

数作出明确规定,且 CFD 模拟结果显示在坡地工况下体型系数较平地工况更大。鉴于此,本文对比各倾角在不同坡度地形下的体型系数,选取坡度为 30° 最不利工况,对体型系数 μ_s 按表 4 提出修正(其中 γ 表示坡度),工程中在坡度地形下进行光伏设计时可以此参考。

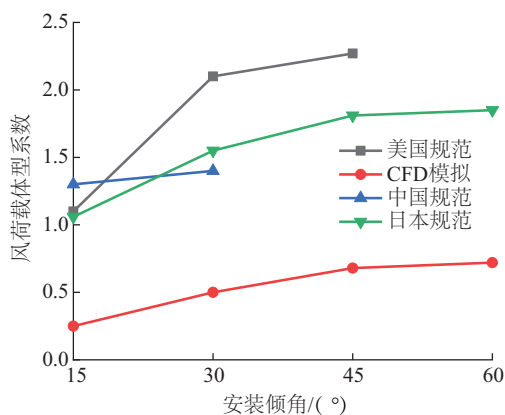


图 11 0° 坡度下各国规范体型系数与 CFD 模拟值

Fig. 11 Normative body shape coefficients and CFD simulation values for each country at 0° of slope

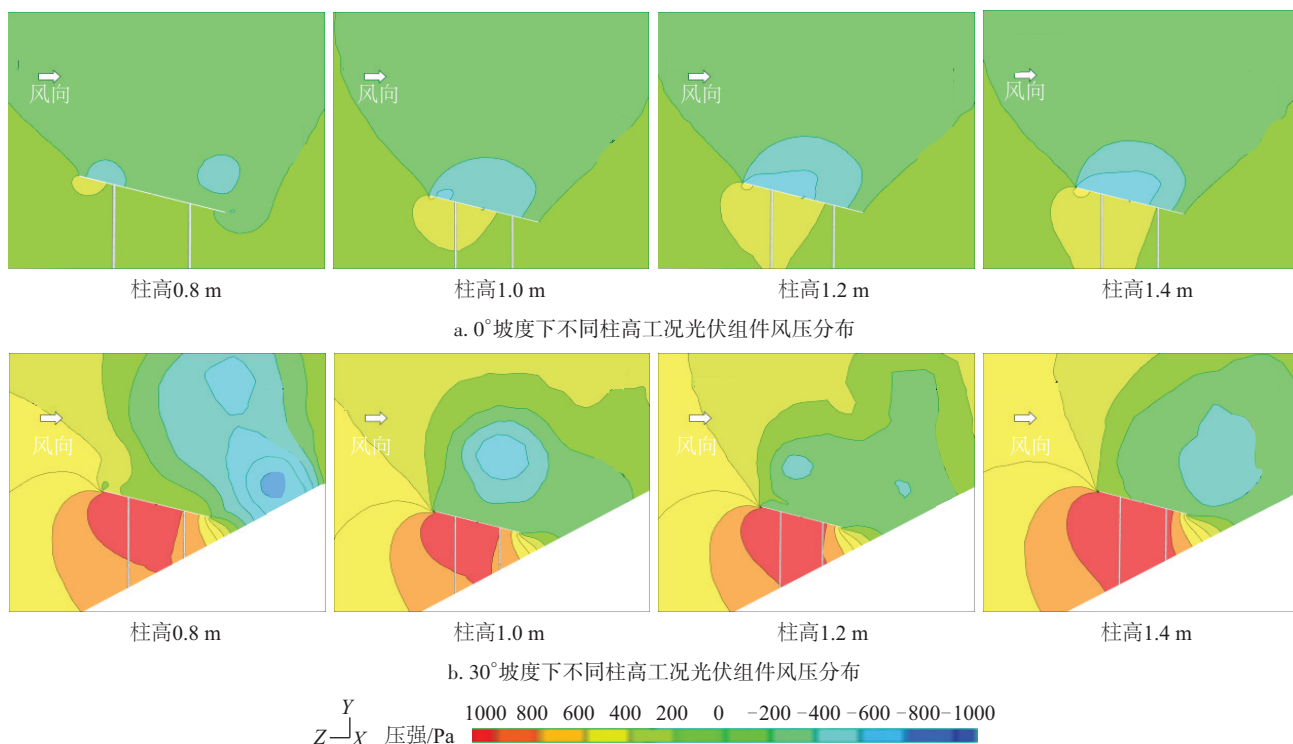


图 12 不同柱高下光伏组件风压云图

Fig. 12 Wind pressure diagrams of PV modules at different column heights

2.2 单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数对比

2.2.1 不同坡度下单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数对比

为更切合光伏组件的实际应用,选取在最不利风向角

表 4 最不利安装倾角工况下风荷载体型系数随坡度变化建议值

Table 4 Suggested value of shape coefficient of wind load changing with slope under most unfavorable installation angle condition

安装倾角/($^\circ$)	光伏组件迎风面	光伏组件背风面
$15^\circ \sim 30^\circ$	$0.0067\gamma + 1.21$	$-0.0053\gamma - 0.090$
$30^\circ \sim 45^\circ$	$0.0040\gamma + 1.20$	$-0.0013\gamma - 0.021$
$45^\circ \sim 60^\circ$	$0.0027\gamma + 1.26$	$-0.0120\gamma + 0.270$

2.1.7 不同柱高下坡度对光伏组件风荷载影响

本节以最危险风向角 180° 为例,探究不同柱高下坡度对光伏组件风压分布的影响,如图 12 所示。

由图 12 可知,在 0° 坡度(平坦地形)下,当柱高从 0.8 m 增至 1.4 m,迎风面压力最大区域逐渐扩大。而在 30° 坡度地形中,随着柱高增加,光伏组件迎风面暴露程度进一步提高,同时绕流效应减弱,迎风面高压区显著扩大,高压区占光伏组件面积的 95%。背风区域呈负压,并随坡度和柱高增加略有扩大。表明不同柱高下坡度对光伏组件受压范围的影响与其离地高度相关,光伏组件离地越高,受绕流效应影响越小。

(180°)和安装倾角为 15° 的条件下进行不同坡度单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数的对比。图 13 为单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数对比。如图 13 所示,在不同坡度条件下,单组串光伏组件体型系数均大于光伏阵列组件体型系数。光伏阵列组件中,第 1 行光伏组件体型系数最

大,第3行次之,第2行最小。此现象主要归因于遮挡效应对来流风的影响,导致风流在第1行光伏组件处分离,并在第3行光伏组件处再聚集,从而使得单组串光伏组件体型系数大于光伏阵列组件,且第1行体型系数最大。

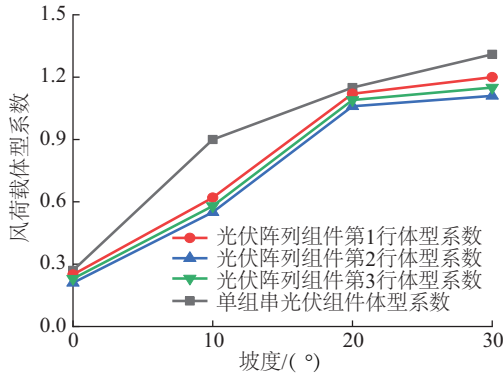


图13 不同坡度下单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数对比

Fig. 13 Comparison of single-string PV module and PV array module body shape coefficients at different slopes

2.2.2 不同光伏组件安装倾角下单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数对比

本节选取在最不利风向角(180°)和 30° 坡度地形条件下进行不同光伏组件安装倾角单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数的对比。图14为单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数对比。

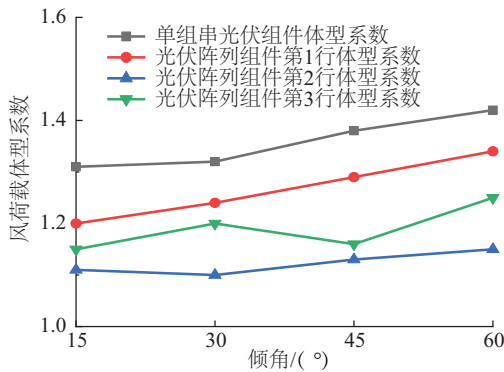


图14 不同安装倾角下单组串光伏组件与光伏阵列组件体型系数对比

Fig. 14 Comparison of single-string PV module and PV array module shape coefficients at different mounting tilts

如图14所示,在不同光伏组件安装倾角条件下,单组串光伏组件的体型系数仍最大。在光伏阵列组件中,受来流风绕流效应影响,第1行光伏组件的体型系数最大,第3行次之,第2行最小。同时结合图9可见,随着光伏组件安装倾角的增大,绕流效应减弱,导致光伏阵列组件各行光伏组件体型系数的差距增大。

2.3 不同坡度下光伏阵列组件迎风面风荷载特性

2.3.1 阵列间距对光伏组件迎风面风荷载影响

选取在最不利风向角(180°)及 30° 坡度工况下,分析光伏组件安装倾角为 15° 且光伏阵列组件第2、3行光伏组件间距分别为5.0、6.5、8.0和9.5 m工况下对光伏组件风压分布规律的影响,为便于对比,保持第1、2行光伏组件间距不变,调整第2、3行光伏组件间距进行分析。图15显示了不同间距下光伏阵列组件第2、3行迎风面的风压分布云图。由图15可见,在 30° 坡度条件下,第2行光伏组件的风压大小因遮挡效应有所降低。对比第3行风压分布可发现,随着第2、3行光伏组件间距的增大,前排对后排的遮挡效应减弱,后排光伏组件的受风面积增加,使第3行光伏组件的高压区显著扩大。综上,增大阵列间距会增加后排光伏组件的直接受风面积,从而导致光伏组件所受风压上升。

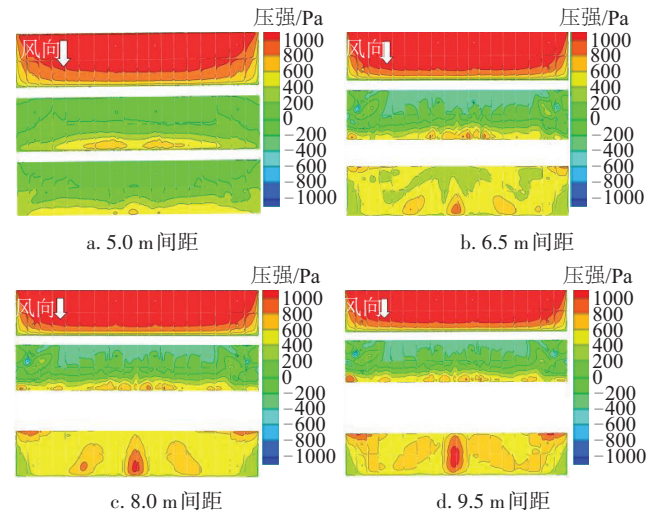


图15 坡度 30° 下光伏阵列组件倾角 15° 时第2、3行不同间距下迎风面风压云图

Fig. 15 Wind pressure maps on windward side of second and third rows with different spacing for PV array module tilt angle of 15° at slope of 30°

图16展示了光伏阵列组件的体型系数曲线,结合图15可得出结论:当风向角为 180° 时,第2行光伏组件的体型系数变化幅度较小。随着第2、3行光伏组件间距的增大,光伏阵列组件后排所受遮挡效应减弱,使得第3行光伏组件的体型系数持续上升,导致第2、3行光伏组件体型系数差距不断增大。

2.3.2 不同坡度下光伏阵列组件迎风面的遮挡效应

选取最不利风向角(180°)工况下,分析坡度对光伏阵列组件风压分布规律及体型系数影响,图17和图18分别为不同坡度下光伏阵列组件迎风面风压分布及体型系数曲线。

图17结果表明,当坡度为 0° (平坦地形)时,第1行光伏组件最大正压区域占光伏组件面积的10%。由于遮挡效应的存在,第2行光伏组件风压有所下降,而第3行略高于第2

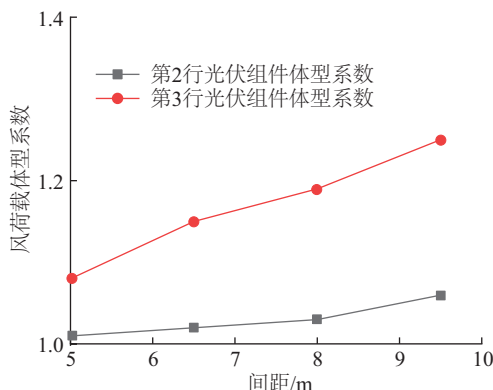


图 16 坡度 30° 下光伏阵列组件倾角 15° 时
第 2、3 行不同间距下风荷载体型系数

Fig. 16 Wind load body shape coefficients for second and third rows with different spacing at PV array module tilt angle of 15° at slope of 30°

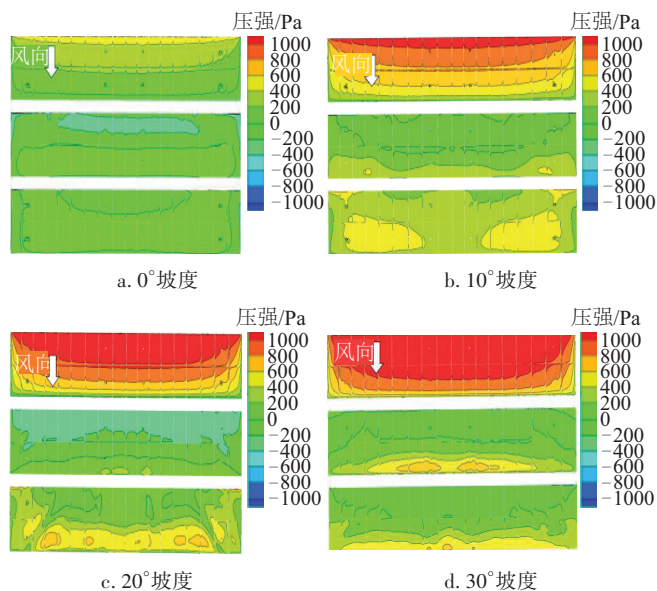


图 17 不同坡度下光伏阵列组件倾角迎风面风压云图

Fig. 17 Wind pressure contours on windward surface of PV modules with different tilt angles under varying slope gradients

行。随着坡度增至 30°, 遮挡效应减弱, 后排光伏组件受风面积增大, 第 1 行最大正压区域扩展至 60%, 第 2、3 行高压区也显著增加。

由图 18 可知, 180° 风向角时, 第 1 行光伏组件体型系数最大, 第 2 行最小。同时, 坡度越大对应光伏阵列组件体型系数越大, 随着坡度增加, 光伏阵列组件的遮挡效应减弱, 导致第 2、3 行体型系数与第 1 行差距不断减小。

光伏组件倾角为 30°、45° 和 60° 时, 其遮挡效应与 15° 倾角时相似。为直观展示第 1 排光伏组件对后排的遮挡效应, 表 5 列出了在风向角 180° 下不同倾角的光伏阵列组件后两排光伏组件折减系数, 折减系数按式(8)计算。

$$c_2 = \frac{(\mu_{s1} - \mu_{s2})}{\mu_{s1}} \quad (8)$$

式中: c_2 ——第 2 行光伏组件的折减系数; μ_{s1} 、 μ_{s2} ——第 1 行和第 2 行光伏组件风荷载体型系数。同理可求 c_3 。

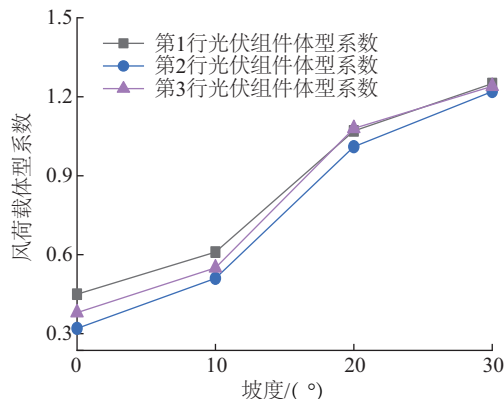


图 18 不同坡度下 180° 风向角 15° 光伏阵列组件倾角
体型系数曲线

Fig. 18 Shape coefficient curves for 180° wind angle and 15° PV array module tilt angle at different terrain slopes

表 5 折减系数

Table 5 Reduction coefficients

	坡度/(°)			
	0	10	20	30
15° 倾角第 2 行	0.160	0.113	0.054	0.075
15° 倾角第 3 行	0.080	0.065	0.027	0.042
30° 倾角第 2 行	0.418	0.115	0.245	0.161
30° 倾角第 3 行	0.345	0.282	0.045	0.032
45° 倾角第 2 行	0.674	0.276	0.226	0.124
45° 倾角第 3 行	0.605	0.195	0.122	0.109
60° 倾角第 2 行	0.696	0.417	0.219	0.142
60° 倾角第 3 行	0.609	0.333	0.048	0.067

结合图 17、图 18 和表 5 的分析结果, 可得出以下结论: 在相同光伏组件安装倾角下, 第 2 行光伏组件与第 3 行光伏组件的折减系数最大差值为 0.2, 且随着坡度增加, 差值逐渐减小, 表明坡度增大使后排光伏组件更直接受来流风的作用, 从而减弱了遮挡效应。在相同坡度条件下, 后排光伏组件的折减系数最高可达 0.696, 说明光伏组件倾角影响风流动, 增加了第 1 行对后排光伏组件的遮挡效应, 而坡度增大后, 光伏组件安装倾角的影响逐渐减小。在坡度从 20° 增至 30° 时, 来流风直接作用于第 3 行光伏组件, 导致高安装倾角光伏组件折减系数最大减少 45%。

3 结 论

本文通过 CFD 数值模拟对不同坡度地形下光伏组件与

光伏阵列组件模型进行风荷载特性研究,得出以下主要结论:

1)风向角对光伏组件的风压分布影响显著。随着地形坡度增加,光伏组件正压和负压增大。最大正压和负压出现在风向角 180° 附近,此时边缘处上下表面体型系数差值达到1.40,易发生风致损坏。

2)不同坡度下的光伏组件安装倾角和柱高对风压影响显著。坡度导致流体产生绕流现象,对低倾角光伏组件背风面影响较大,而对高倾角光伏组件影响较小,但柱高的增加会减弱绕流效应。因此,应依据实际坡度选择适当系数,并对光伏组件边缘等易受损部位予以局部加固。

3)在不同坡度及不同光伏组件安装倾角工况下,单组串光伏组件体型系数均大于光伏阵列组件体型系数,且光伏阵列组件由于遮挡效应的存在使得第1行光伏组件体型系数最大,第3行次之,第2行最小。

4)就所有形式光伏阵列组件而言,当风向角为 180° 时,迎风面第1行光伏组件所受风压最大,且由于遮挡效应将导致后排光伏组件体型系数折减程度最大达到70%;随着坡度及光伏组件间距的增大,其遮挡效应相应减弱,表现为光伏组件折减系数减少幅度高达45%。

[参考文献]

- [1] JUBAYER C M, HANGAN H. Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2014, 134: 56-64.
- [2] 邹云峰, 李青婷, 殷梅子, 等. 跟踪式光伏结构风荷载规范规定值与风洞试验值对比[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(4): 1331-1340.
- ZOU Y F, LI Q T, YIN M Z, et al. Comparison of wind load standard values of tracking photovoltaic (PV) structure with wind tunnel test values [J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2022, 53(4): 1331-1340.
- [3] 许宁, 李旭辉, 高晨崇, 等. 光伏系统风荷载体型系数分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(10): 17-22.
- XU N, LI X H, GAO C C, et al. Analysis of shape coefficients of wind loads of photovoltaic system [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(10): 17-22.
- [4] 殷梅子, 邹云峰, 李青婷, 等. 单排跟踪式光伏结构风荷载风洞试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(9): 2354-2362.
- YIN M Z, ZOU Y F, LI Q T, et al. Wind tunnel test study on wind load of single row tracking photovoltaic structure [J]. *Journal of railway science and engineering*, 2020, 17(9): 2354-2362.
- [5] 全勇, 吴建高, 陈艳, 等. 风向角和倾角对光伏阵列风荷载的影响[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(1): 25-31.
- QUAN Y, WU J G, CHEN Y, et al. Influence of wind direction and inclination angle on wind load of photovoltaic arrays [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(1): 25-31.
- [6] 高亮, 窦珍珍, 白桦, 等. 光伏组件风荷载影响因素分析[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(8): 1931-1937.
- GAO L, DOU Z Z, BAI H, et al. Analysis of influence factors for wind load of PV module [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2016, 37(8): 1931-1937.
- [7] 黄伯城, 马文勇, 刘庆宽, 等. 串联光伏板体型系数遮挡效应研究[C]//第25届全国结构工程学术会议. 北京, 中国, 2016: 326-329.
- HUANG B C, MA W Y, LIU Q K, et al. Study on the effect of sheilding tandem photovoltaic panels shape coefficient [C]//Proceedings of The 25th National Conference on Structural Engineering. Beijing, China, 2016: 326-329.
- [8] REINA G P, DE STEFANO G. Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel arrays [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2017, 170: 283-293.
- [9] BANKS D, MERONEY R N, SARKAR P P, et al. Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2000, 84(1): 65-85.
- [10] SOLARI G. Wind science and engineering: origins, developments, fundamentals and advancements [M]. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [11] HOLMES J D, PATON C, KERWIN R. Wind loading of structures [M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007.
- [12] 陈伏彬, 王羽, 祝瑜哲, 等. 考虑斜坡地形影响的光伏组件流固耦合风致振动数值模拟研究[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(3): 404-411.
- CHEN F B, WANG Y, ZHU Y Z, et al. Numerical simulation of FSI wind-induced vibration of solar panels considering influence of slope landform [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2025, 46(3): 404-411.
- [13] XU A, MA W Y, YANG W S, et al. Study on the wind load and wind-induced interference effect of photovoltaic (PV) arrays on two-dimensional hillsides [J]. *Solar energy*, 2024, 278: 112790.
- [14] KOEKEMOER J H, BREDELL J R, VENTER G, et al. Field measurements of wind load effects in a photovoltaic single-axis tracker mounting rail [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2024, 253: 105876.
- [15] 方平治, 顾明, 谈建国, 等. 阻塞率对表面风压系数影响的数值模拟[J]. *建筑科学与工程学报*, 2013, 30(3): 101-106.

- FANG P Z, GU M, TAN J G, et al. Numerical simulation of effect of blockage ratio on facade pressure coefficient [J]. *Journal of architecture and civil engineering*, 2013, 30(3): 101-106.
- [16] 孙晓颖, 许伟, 武岳. 钝体绕流中的计算域设置研究 [C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会风工程委员会. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集. 大连, 中国, 2007: 1036-1041.
- SUN X Y, XU W, WU Y. Research on computational domain setting in blunt body bypass flow [C]//Wind Engineering Committee of Bridge and Structural Engineering Division, Chinese Society of Civil Engineering. Proceedings of the 13th National Conference on Structural Wind Engineering. Dalian, China, 2007: 1036-1041.
- [17] BAETKE F, WERNER H, WENGLE H. Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 1990, 35: 129-147.
- [18] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012, Load code for the design of building structures[S].
- [19] ASCE/SEI 7—10, Minimum design loads for buildings and other structures[S].
- [20] JIS C8955—2017, Load design guide on structures for photovoltaic array[S].

RESEARCH ON WIND LOAD CHARACTERISTICS OF PHOTOVOLTAIC MODULES UNDER DIFFERENT SLOPE TERRAIN

Dou Hongqiang¹, Yang Jianxin¹, Li Ru², Wang Longwei²

(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou 311122, China)

Abstract: This study aims to elucidate the influence of terrain slope on wind pressure distribution and wind load shape coefficients of PV modules through computational fluid dynamics (CFD) simulations using FLUENT software. The Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations coupled with the shear stress transport (SST) turbulence model were employed to investigate the wind pressure distribution patterns and wind load shape coefficients under various configurations, including different PV module inclination angles, wind direction angles, and terrain slopes. The findings reveal that both wind direction angle and mounting inclination angle significantly influence the wind load magnitude on PV modules across different terrain slopes. While terrain features induce wind bypass effects, these effects gradually diminish with increasing column height. Furthermore, under various slope conditions and mounting inclinations, single-string PV modules consistently exhibit higher shape coefficients compared to PV array configurations. The investigation also demonstrates substantial shading effects within PV arrays, resulting in distinctive wind load characteristics for subsequent rows. Specifically, the shape coefficients experience maximum attenuations of 70% and 66% for the second and third rows of PV modules, respectively. However, the presence of terrain slope significantly mitigates these shading effects, reducing the maximum attenuation by up to 45%.

Keywords: slope; numerical simulation; wind load; photovoltaic module; shape coefficient; shading effect