

海上光伏阵列风压系数的试验研究

张积乐¹, 卢国华^{2*}, 蔚泽坤¹, 陈睿¹, 郭铎³, 周恒毅³

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013; 2. 山东建筑大学 管理工程学院, 济南 250101;
3. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为给固定式海上光伏结构的抗风设计提供参考, 文中通过风洞试验测得光伏阵列模块表面的风压系数, 并结合数值模拟方法得到了光伏模块周围的流场分布。依托试验数据, 分析了典型风向角下模块表面的风压系数分布特征与光伏阵列间的遮挡效应, 总结了典型测点风压系数随风向角的变化规律。结果表明: 当来流方向正对光伏模块的最高或最低边缘时, 阵列迎风端模块的风荷载偏大、梯度变化显著; 沿来流方向各列光伏模块的体型系数绝对值呈逐渐减小的趋势, 迎风第2排光伏模块受前排模块遮挡效应作用最显著; 不同风向角工况下, 阵列中轴线附近测点的风压系数基本呈对称变化; 受边缘效应影响, 阵列侧边端部测点的风压系数数值更大, 且随风向角波动更剧烈。

关键词: 海上光伏; 风洞试验; 风压系数; 体型系数; 数值模拟; 遮挡效应; 边缘效应

中图分类号: TM615, P752, TU312.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)09-0085-07

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20250219001

Experimental Study on Wind Pressure Coefficients of Offshore Photovoltaic Arrays

ZHANG Jile¹, LU Guohua^{2*}, YU Zekun¹, CHEN Rui¹, GUO Duo³, ZHOU Xuanyi³

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China; 2. School of Management Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

*Corresponding author: luguohua@sdjzu.edu.cn

Abstract: In order to provide a reference for the wind-resistant design of fixed offshore photovoltaic structures, wind pressure coefficients of photovoltaic array module surfaces were determined through wind tunnel tests, and the flow field around photovoltaic modules was obtained through numerical simulation. Based on the test data, the distribution characteristics of the wind pressure coefficients of the module surfaces and the shielding effects between arrays were analyzed, and the variation in the wind pressure coefficients at typical measurement points with wind direction angle was summarized. The results show that when the incoming flow is directed toward the highest or lowest edge of the photovoltaic module, the wind load on the surface of the module at the windward end of the array is large and exhibits a pronounced gradient. The absolute values of the shape coefficients of each column of photovoltaic modules show a gradually decreasing trend along the direction of incoming flow, and the second windward row is most significantly affected by the shielding effect from the front row. At different wind direction angles, the wind pressure coefficients at measurement points near the central axis of the array exhibit approximately symmetric variations. Owing to edge

收稿日期: 2025-02-19

作者简介:

张积乐(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海上新能源结构设计及优化方面的研究。E-mail: zhangjiile@spic.com.cn。

通信作者:

卢国华(1978—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事工程管理和安全管理方面的研究。E-mail: luguohua@sdjzu.edu.cn。

effects, the wind pressure coefficients at measurement points of the array edge are larger and varied more sharply with the wind direction angle.

Keywords: offshore photovoltaic; wind tunnel test; wind pressure coefficient; shape coefficient; numerical simulation; shielding effect; edge effect

在“双碳”战略实施背景下,海上光伏作为新型能源开发形式,得到行业广泛关注。固定式海上光伏结构具备大跨度、低阻尼的结构特点,风力作用下易产生变形,严重时会引起结构失效。风荷载作为光伏结构的主要控制荷载,直接关系光伏电站设计安全性与建设运维成本,因此合理确定海上光伏阵列风荷载取值具有重要工程价值。

近年来,国内外诸多学者针对陆地光伏结构风荷载开展了大量研究。高亮等^[1]通过风洞试验研究了光伏板高度、板面倾角、阵列间距等参数对组件风荷载的影响规律,给出了光伏板表面风荷载的计算公式。李寿科等^[2]通过风洞试验,对比了光伏板端部封闭、敞开两种工况下的风荷载特性。张大千等^[3]、张学森等^[4]分别研究了墙体对近地面光伏、屋盖光伏阵列风荷载的影响,发现一定高度的墙体可有效提升光伏板的抗风性能。WARSIDO等^[5]通过风洞试验,分析了地面、屋顶光伏阵列在不同排布间距下的风荷载特性。陈权等^[6]对比多本规范中光伏支架风荷载的取值规定,发现风洞试验实测风压系数明显低于规范建议取值。李寿英等^[7]基于风洞试验,研究了光伏组件风致响应随风速的变化规律,验证了各类气动措施对提升颤振临界风速的作用效果。马文勇等^[8-9]利用风洞试验分析了底部阻塞率对光伏板风荷载的影响,并提出了均匀分布、梯形分布及偏心距三类风荷载取值模型。此外,许多学者围绕光伏阵列间的遮挡效应开展了系列研究^[10-13],重点分析光伏板倾角、组数、间距等参数的影响。

海上光伏阵列模块构造接近大跨屋盖结构,但现阶段针对大跨度海上光伏阵列风压系数的研究较少,现有相关规范^[14-16]难以准确给出大跨度光伏模块表面风压分布规律与体型系数取值标准。基于上述现状,本文通过风洞试验研究了不同风向角下海上光伏阵列的风压系数变化特性,试验结论可为大跨度海上光伏支架的抗风设计提供参考。

1 风洞试验概况

1.1 研究对象

固定式海上光伏模块以大面积的阵列形式敷设于特定海域,各光伏模块横向间距为2 m,纵向间距为25 m;单个光伏模块尺寸为48.5 m×36.7 m,模块最低点距海平面高度为9 m,光伏板面与水平面夹角为15°。各光伏组件采用钢桁架支撑体系,下部结构由四根嵌入海底岩层的钢管

桩组成,单个光伏模块结构效果图如图1所示。

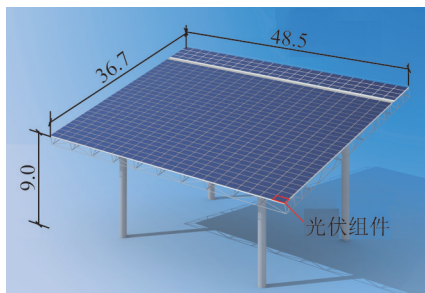


图1 光伏模块结构(单位:m)

Fig. 1 Photovoltaic module structure (unit: m)

1.2 风洞试验方法

本次光伏阵列刚性试件测压试验在同济大学TJ-3大气边界层风洞中开展。鉴于光伏阵列所处区域为开阔海域,因此试验模拟A类地貌风场,平均风速剖面指数取0.12;试件顶部高度处的来流风速 U_H 设定为 $10.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风洞试验风速剖面如图2所示,图2中 $U(z)$ 为测点的风速、 z 为测点高度、 H 为试件顶部高度。受试验条件限制,本次试验未考虑海浪对近海风剖面的扰动作用,海浪与环境风的相互作用有待后续深入研究。

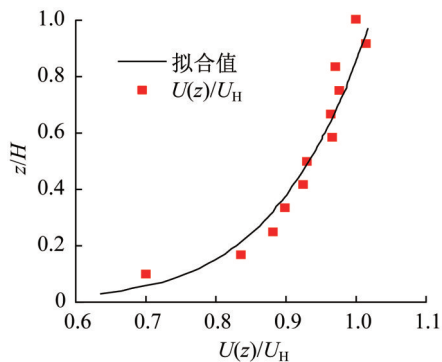


图2 风洞试验风速剖面

Fig. 2 Wind speed profile of wind tunnel test

风洞试验试件由6排10列的光伏模块组成,几何缩尺比为1/150;试件采用有机玻璃板加工成型,板材强度、刚度充足,可避免试件在试验风速下发生明显变形与振动,保障了刚性测压试验的测试精度。风场整体布置与试验试件如图3所示。单个光伏模块上下表面分别对称布设测点,共11行、每行13个测点,单模块测点总数为286个;为便于结果分析,选取光伏模块轴线上、中、下三处测点命名为a1、a2、a3;同时将各光伏模块划分为9个

区域,编号为S1~S9。试验风向角按逆时针方向递增,间隔 10° 设置一组工况,共计36个风向角;阵列排号定义为R1~R6,列号定义为C1~C10,风向角定义、模块编号规则与测点布置形式如图4所示。

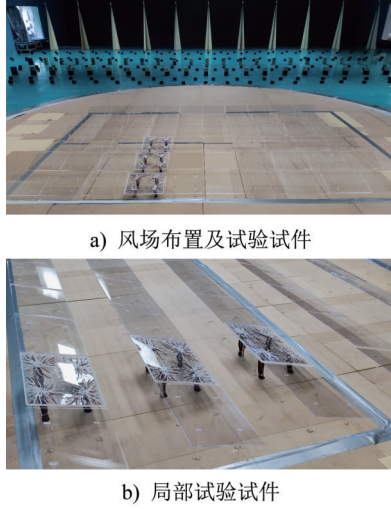


图3 风场布置及风洞试验模型

Fig. 3 Arrangement of wind field and wind tunnel test model

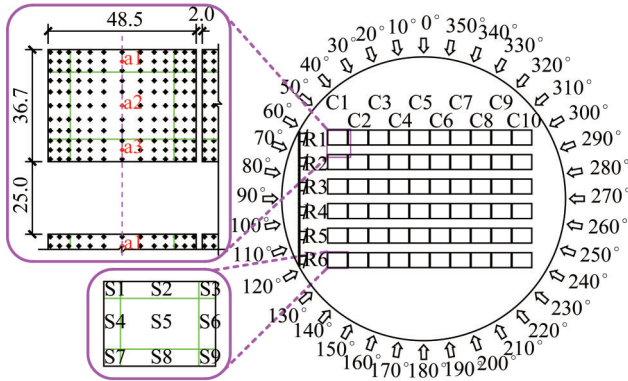


图4 风向角定义、模块命名及测点布置(单位:m)

Fig. 4 Wind direction definition, module naming and measuring point arrangement (unit: m)

1.3 参数定义

光伏组件表面的风压采用无量纲的风压系数 C_{pi} 表示,计算公式见式(1):

$$C_{pi} = (p_i - p_\infty) / (0.5\rho U_H^2) \quad (1)$$

式中: p_i 为测点处风压; p_∞ 为参考点静压; ρ 为空气密度; U_H 为参考高度处风速。将各测点的风压系数时程进行概率统计可得到平均风压系数 $\bar{C}_{pi}$ 和脉动风压系数 C'_{pi} ;风压系数的极大值 C_{pmax} 和极小值 C_{pmin} 计算公式见式(2)、式(3):

$$C_{pmax} = \bar{C}_{pi} + kC_{prms} \quad (2)$$

$$C_{pmin} = \bar{C}_{pi} - kC_{prms} \quad (3)$$

式中: C_{prms} 为风压系数的均方根; k 为峰值因子,取 $3.5^{[17]}$;某测点在所有风向角下最大的 C_{pmax} 和最小的 C_{pmin} 分别称之为最大极值风压系数和最小极值风压系数。为便于分析,采用 $\bar{C}_{pui}$ 、 $\bar{C}_{pli}$ 表示测点上、下表面的平均风压系数,采用 $\bar{C}_{pneti}$ 表示测点的净平均风压系数,其中 $\bar{C}_{pneti} = \bar{C}_{pui} - \bar{C}_{pli}$;同理可得出净脉动风压系数和净极值风压系数。

测点的体型系数采用 μ_{si} 表示,各模块的体型系数采用 μ_s 表示,计算公式见式(4)、(5):

$$\mu_{si} = \bar{C}_{pneti} (z_G/z)^{2\alpha} \quad (4)$$

$$\mu_s = \left(\sum_{i=1}^n \mu_{si} \mu_{zi} A_i \right) / (\mu_z A) \quad (5)$$

式中: z_G 为梯度风高度,A类地貌取300 m; z, μ_{zi}, A_i 分别为测点 i 的实际高度、风压高度变化系数和所属面积; α 为剖面指数; μ_z 为模块中心处的风压高度变化系数; A 为模块的面积。

风压系数的正负号规定如下:当风压指向构件表面(压力)时系数为正,而当背离构件表面(吸力)时系数为负。净风压系数的正负号与上表面风压系数保持一致。

2 试验结果分析

2.1 风压系数分布规律

由于本次试验光伏模块数量较多,受篇幅限制,文中仅展示R1C1、R1C5、R3C1、R3C5、R6C1、R6C5六组典型模块在 0° 和 180° 风向角下,上、下表面平均风压系数和净平均风压系数等值线图,如图5所示,图中H表示模块较高位置边缘,L表示较低位置边缘。由图5可知:C5列模块(R1C5、R3C5、R6C5)位于阵列中轴线附近,其平均风压系数沿来流方向基本呈对称分布,而阵列边缘C1列模块(R1C1、R3C1、R6C1)的平均风压系数分布存在明显非对称特征。由图5a)可知:在 0° 风向角下,各模块上表面的平均风压系数均为负值;受后排尾流干扰,R6排模块上表面风压系数绝对值小幅增大,最大值约0.8;下表面平均风压系数沿来流方向呈现减小趋势,各模块下表面低侧边缘及C1列模块下表面左侧边缘均出现负压,该现象由气流在阵列端部发生流动分离导致。迎风首排R1中各模块净平均风压系数绝对值整体偏高,风压数值从迎风端至背风端梯度变化显著。由图5b)可知: 180° 风向角下,迎风首排R6模块上表面的平均风压系数基本为正值;R3和R1排模块上表面受前排遮挡效应影响,其平均风压系数均为负值;此外,R6排模块表面风压梯度变化最为显著,其净平均风压系数由迎风端约1.00衰减至背风端约0.10;R3排模块的净平均风压系数显著小于R6排模块的净平均风压系数,直观体现前排模块对后排的遮挡作用。

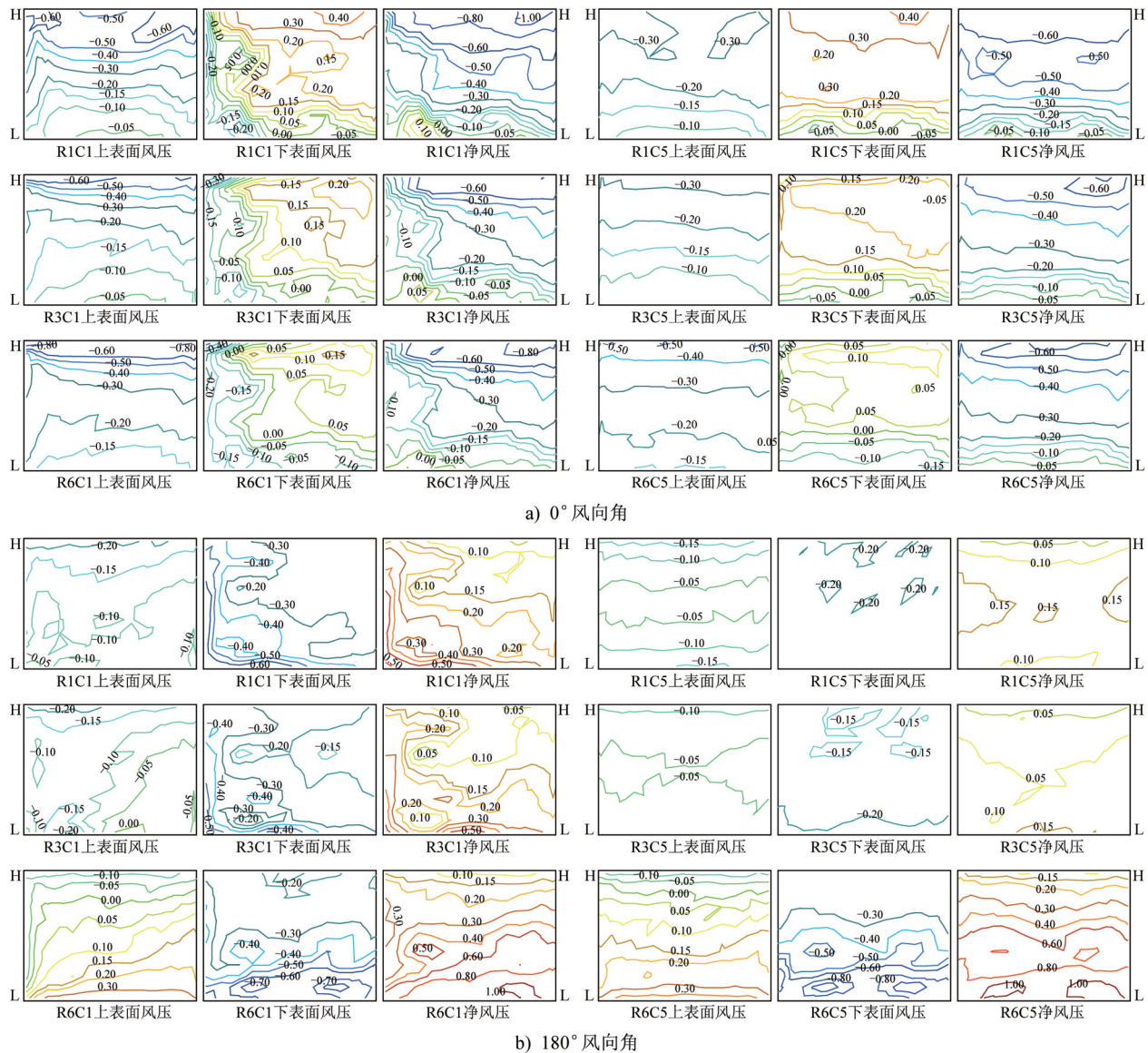


图5 典型光伏模块的上、下表面净平均风压系数等值线图

Fig. 5 Net average wind pressure coefficient contours on upper, lower surfaces of typical photovoltaic modules

表1列出了前5个测点的净极值风压系数及其对应所属位置,其中模块分区S1~S9编号见图4。由表1可

表1 前5个测点的净极值风压系数

Table 1 Net extreme wind pressure coefficients of the first five measurement points

最大净极值风压系数			最小净极值风压系数		
C_{pmax}	所属模块	所属区域	C_{pmin}	所属模块	所属区域
3.86	R1C1	S4	-6.43	R6C1	S1
3.66	R1C1	S7	-6.02	R6C1	S1
3.48	R2C1	S4	-5.79	R3C1	S1
3.47	R6C5	S7	-5.74	R3C1	S1
3.43	R6C4	S7	-5.26	R1C3	S3

知:光伏模块的最不利正极值风压系数为3.86,对应测点位于R1C1模块侧边端部S4区域;最不利负极值风压系数为-6.43,对应测点位于R6C1模块角部S1区域。同时可见,净极值风压系数集中分布于阵列边缘模块(R1、R6、C1、C10);最大净极值风压系数多出现于模块侧边端部区域(S4、S7),最小净极值风压系数则多出现于模块高侧端部区域(S1、S3)。因此,结构设计阶段需重点验算阵列边缘模块端部区域的风荷载承载力。

2.2 典型截面流场分析

为完整揭示光伏阵列风压形成机理,本文结合数值模拟手段,分别对0°和180°风向角下的流场进行分析。由于光伏阵列横向延展较长,绕流以竖向流动为主,因此采用二维CFD法进行模拟;湍流模型采用Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,模型缩尺比及来流风速与风洞试验保持一致;

模块表面首层网格高度为 3.3×10^{-4} mm, 整体网格总量约 44 万个。图 6 给出了两种风向角下的风速云图与流线图, 由图 6 可知: 0° 风向角下, R1 模块高侧边缘产生明显气流分离; 并且受 R2 模块阻挡, R1 背风侧形成两处较大旋涡, 从而导致 R1 上表面出现绝对值较大的负压; R2 背风侧形成的旋涡形态与 R1 相似。 180° 风向角下, R6 迎风低侧边缘发生气流分离, 背风面形成大型旋涡, 上下表面风压叠加使 R6 承受较大正向风压, 与风洞试验结果相互印证; 受光伏模块间气动干扰, R5 迎风面附近形成多个较小旋涡。此外, 从图中还可看出, 在两种风向角下自迎风第 3 排模块往后, 气流分布趋于稳定。

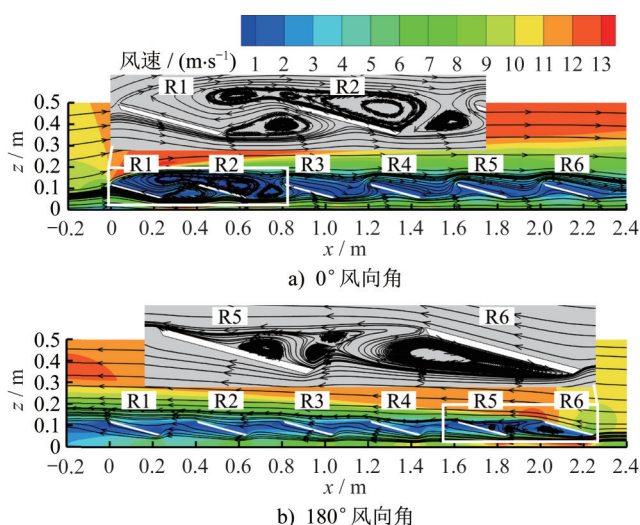


图 6 光伏模块周围风速云图及流线图

Fig. 6 Wind speed contour and streamlines around photovoltaic modules

2.3 典型测点风压系数随风向角变化

图 7 为典型光伏模块中部分测点的平均风压系数及脉动风压系数随风向角的变化曲线, 测点位置如图 4 所示。由图 7 可知: 由于 C5 列各光伏模块中的 a1、a2、a3 测点位于阵列中轴线附近, 其风压系数随风向角基本呈对称变化; 受边缘效应影响, C1 列测点的净平均风压系数正峰值出现在 150° 斜风向; 此外, C1 列测点的净平均风压系数和净脉动风压系数均大于 C5 列的相应值, 且随风向角波动幅度更大。阵列中部 R3C5 模块受来流扰动最弱, 全风向角范围内风压系数整体偏小、变化平缓。由图 7a)~c) 进一步分析: C1 列模块中高位侧 a1 点在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 风向角区间风压系数发生突变, 其净平均风压系数峰值达到 -1.2 左右, 脉动风压系数最大值超过 0.35 , 这说明阵列边缘区域气流分离作用强烈, 斜风工况下光伏组件将承受更大风荷载, 结构设计需着重考虑阵列侧边端部模块高侧区域的抗风破坏风险。

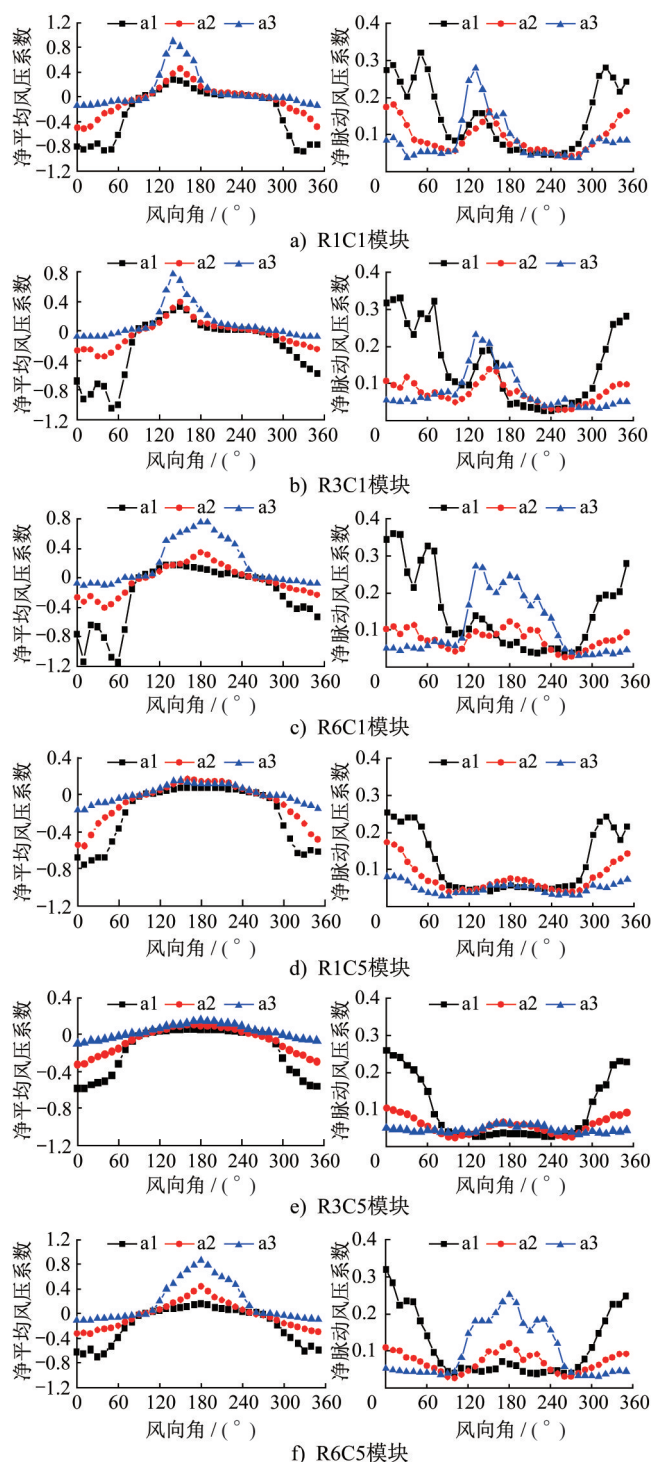


图 7 部分测点风压系数随风向角的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of wind pressure coefficient with wind directions at some measuring points

2.4 体型系数分布规律

为分析光伏模块间体型系数的分布规律, 以迎风首排光伏模块的体型系数 μ_{s1} 为基准, 定义各模块体型系数的折减系数为 η_i :

$$\eta_i = \mu_{si} / \mu_{s1} \quad (6)$$

式中: μ_{si} 为迎风第*i*排光伏模块的体型系数, $i=1\sim6$ 。

图8为 0° 和 180° 风向角下C1~C5列各光伏模块的体型系数及折减系数随位置的变化曲线,图中横坐标1~6代表迎风第1~6排光伏模块。由图8a)可知:两种风向角下,各列模块的体型系数绝对值基本呈逐渐减小的趋势;迎风第2排的体型系数衰减幅度最大,第3~6排衰减

速率放缓,说明迎风第2排受前排遮挡效应的影响最显著。从图8b)可知: 180° 风向角下各列模块的折减系数整体低于 0° 风向角的对应值,这说明在 180° 风向角下上游模块对下游模块的遮挡作用更强; 180° 风向角下各列折减系数的最小值出现在第3或第4排; 0° 风向角下各列折减系数的最小值出现在第5排。

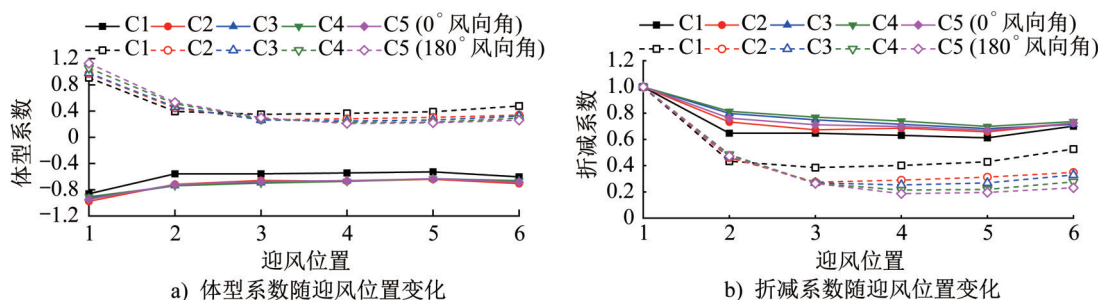


图8 不同位置光伏模块的体型系数及折减系数

Fig. 8 Shape coefficients and reduction coefficients of photovoltaic module at different positions

图9为R1C1、R1C5、R6C1、R6C5四个光伏模块其体型系数随风向角的变化曲线。从图9可以看出:位于阵列中轴线附近的R1C5和R6C5模块,其体型系数随风向角变化呈明显对称性;而位于阵列角部的R1C1模块与同排R1C5模块相比,二者的体型系数主要在 $110^\circ\sim180^\circ$ 风向角区间差值明显;其中R1C1模块的体型系

数正峰值出现在 150° 风向角附近,约为1.05,较同风向角下R1C5模块的体型系数高出约0.80;此外,R6C1与R6C5模块相比,二者的体型系数在 $40^\circ\sim70^\circ$ 风向角区间差异显著,R6C1模块的体型系数在 50° 风向角附近达到-1.05负峰值,其绝对值远高于R6C5模块的对应值。综上,阵列边角区域模块对风向角变化的响应更敏感。

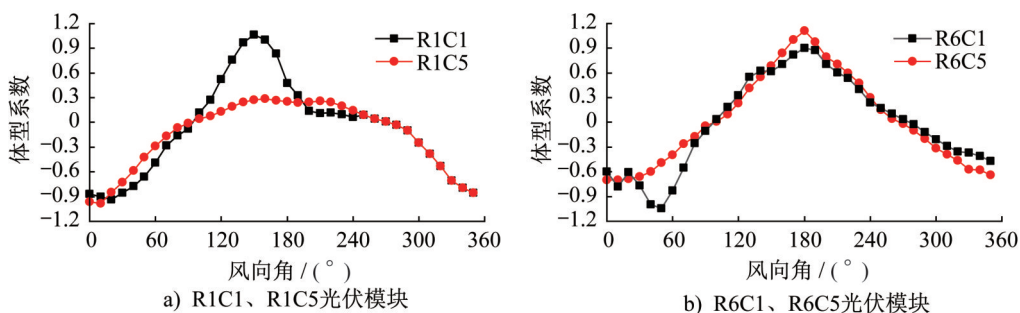


图9 光伏模块体型系数随风向角的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of shape coefficients of photovoltaic modules with wind directions

3 结论

(1) 0° 、 180° 两种典型风向角下,阵列迎风端模块风荷载数值最大,风压梯度变化最显著;迎风前两排模块周边流场结构复杂,自第3排起阵列内部气流趋于稳定。

(2) 阵列中轴线附近测点风压系数随风向角基本呈对称变化;阵列边缘区域气流分离效应强烈,斜风向工况下光伏组件承受的风荷载更大。

(3) 0° 、 180° 风向角下,迎风第2排模块受前排遮挡效应影响最显著;沿来流方向各列模块体型系数绝对值持续减小; 180° 风向角下上游模块对下游的遮挡作用强于

0° 风向角下上游模块对下游的遮挡作用;阵列边角区域模块体型系数对风向角变化更敏感。

参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2016.08.005.
GAO Liang, DOU Zhenzhen, BAI Hua, et al. Analysis of influence factors for wind load of PV module[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(8): 1931-1937. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2016.08.005. (in Chinese)

- [2] 李寿科,李寿英,陈政清.太阳能电池风荷载试验研究[J].太阳能学报,2015,36(8):1884-1889.DOI:10.3969/j.issn.0254-0096.2015.08.015.
LI Shouke, LI Shouying, CHEN Zhengqing. Experimental investigation of wind loading of solar panels[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(8): 1884-1889. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2015.08.015. (in Chinese)
- [3] 张大千,常方园.有围墙遮挡的近地面光伏阵列风荷载特性分析[J].沈阳航空航天大学学报,2019,36(2):41-49.DOI:10.3969/j.issn.2095-1248.2019.02.007.
ZHANG Daqian, CHANG Fangyuan. Analysis of wind loads on ground-mounted PV arrays with wall shielding [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2019, 36(2): 41-49. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2019.02.007. (in Chinese)
- [4] 张学森,李丹,吴香国,等.建筑女儿墙对光伏板风载特性影响的风洞试验研究[J].建筑结构,2022,52(14):115-123. DOI:10.19701/j.jzjg.YG220091.
ZHANG Xuesen, LI Dan, WU Xiangguo, et al. Wind tunnel test study on influence of building parapet on wind load characteristics of photovoltaic panel[J]. Building Structure, 2022, 52(14): 115-123. DOI: 10.19701/j.jzjg.YG220091. (in Chinese)
- [5] WARSIDO W P, BITSUAMLAK G T, BARATA J, et al. Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 48: 295-315. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.005.
- [6] 陈权,牛华伟,李红星,等.基于风洞试验与规范规定值的光伏支架风荷载取值研究[J].太阳能学报,2024,45(9):259-267. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-0664.
CHEN Quan, NIU Huawei, LI Hongxing, et al. Research on wind load value of photovoltaic bracket based on wind tunnel test and standard [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(9): 259-267. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-0664. (in Chinese)
- [7] 李寿英,马杰,刘佳琪,等.柔性光伏系统颤振性能的节段模型试验研究[J].土木工程学报,2024,57(2):25-34. DOI:10.15951/j.tmgxcb.22111107.
LI Shouying, MA Jie, LIU Jiaqi, et al. Experimental study on flutter performance of flexible photovoltaic system by segmental model test[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(2): 25-34. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.22111107. (in Chinese)
- [8] 马文勇,孙高健,刘小兵,等.太阳能光伏板风荷载分布模型试验研究[J].振动与冲击,2017,36(7):8-13. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.07.002.
MA Wenyong, SUN Gaojian, LIU Xiaobing, et al. Tests for wind load distribution model of solar panels [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 8-13. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.07.002. (in Chinese)
- [9] 马文勇,柴晓兵,刘庆宽,等.底部阻塞对太阳能光伏板风荷载的影响研究[J].建筑结构,2019,49(2):129-134. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.02.023.
MA Wenyong, CHAI Xiaobing, LIU Qingkuan, et al. Study on effect of bottom flow obstruction on wind load of solar photovoltaic panels[J]. Building Structure, 2019, 49(2): 129-134. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.02.023. (in Chinese)
- [10] 黄张裕,阎虹旭.太阳能光伏板风荷载体型系数群体遮挡效应数值模拟研究[J].特种结构,2015,32(3):18-22.
HUANG Zhangyu, YAN Hongxu. Numerical simulation of group blocking effect of the wind shape coefficients around PV panels[J]. Special Structures, 2015, 32(3): 18-22. (in Chinese)
- [11] 楼文娟,单弘扬,杨臻,等.超大型阵列光伏板体型系数遮挡效应研究[J].建筑结构学报,2021,42(5):47-54. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0754.
LOU Wenjuan, SHAN Hongyang, YANG Zhen, et al. Study of shielding effect on shape coefficient of super-large photovoltaic arrays [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 47-54. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0754. (in Chinese)
- [12] 马文勇,马成成,王彩玉,等.光伏阵列风荷载干扰效应风洞试验研究[J].实验流体力学,2021,35(4):19-25. DOI:10.11729/sytlx20200127.
MA Wenyong, MA Chengcheng, WANG Caiyu, et al. Wind tunnel experimental study on the wind load interference effect of solar panel arrays [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(4): 19-25. DOI: 10.11729/sytlx20200127. (in Chinese)
- [13] 望世雄,王顺波,邱冶.双坡光伏阵列风荷载遮挡效应数值模拟研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(6):829-834. DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.017.
WANG Shixiong, WANG Shunbo, QIU Ye. Numerical study of shielding effect on wind loads of double-slope solar panel arrays [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2024, 47(6): 829-834. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.017. (in Chinese)
- [14] NB/T 10115—2018 光伏支架结构设计规程[S].
NB/T 10115—2018 Code for design of photovoltaic modules support structures[S]. (in Chinese)
- [15] GB 50797—2012 光伏发电站设计标准[S].
GB 50797—2012 Standard for design of photovoltaic power station. (in Chinese)
- [16] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S]. (in Chinese)
- [17] 张相庭.工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M].上海:同济大学出版社,1990.
ZHANG Xiangting. Handbook of wind load theory and wind resistance calculation for engineering structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990. (in Chinese)