文章编号:1674-2974(2024)11-0043-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024106

近地面大长宽比跟踪式光伏阵列风洞试验研究

贺佳[1,2†],廖教宇[1,2],张肖雄[1,2],胡美妃[1,2],张芮洋[1,2],陈政清[1,2]
[1. 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082]

摘 要:为明确近地面风场对跟踪式光伏结构风荷载取值的影响,本文基于风洞试验和计算流体力学(CFD)模拟对单排光伏组件的倾角、风向角、离地高度展开分析,并在此基础上研究了多排光伏阵列在不同风向角下,其遮挡效应对体型系数取值的影响.结果表明:单排光伏组件的表面风压符合梯形分布方式;多排光伏阵列中上游组件对下游的遮挡程度会随倾角的增大而增长,且后排光伏组件体型系数随着前排遮挡的增多逐渐趋于稳定;离地高度对光伏组件及阵列的体型系数存在一定的影响.

关键词:光伏阵列;风洞试验;CFD模拟;体型系数;结构荷载
中图分类号:TU312⁺.1 **文献标志码**:A

Research on Wind Tunnel Test of Near-Ground Tracking Photovoltaic Arrays with Large Aspect Ratio

HE Jia[1,2†], LIAO Jiaoyu[1,2], ZHANG Xiaoxiong[1,2], HU Meifei[1,2],
ZHANG Ruiyang[1,2], CHEN Zhengqing[1,2]
[1. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China]

Abstract: To clarify the influence of near-ground wind fields on tracking photovoltaic (PV) structures, wind tunnel tests and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are conducted in this paper for the analyses of shielding effects and shape factors under different tilt angles, wind direction angle, and height of PV arrays. Building upon this analysis, the paper investigates the impact of shielding effects of multi-row PV arrays on the values of shape coefficient under different wind direction angles. Results show that the surface wind pressure of a single-row PV component follows a trapezoidal distribution. For multi-row PV arrays, as the tilt angle increases, the shielding effects increase significantly. The shape coefficients tend to be stable when the number of upstream PV arrays becomes large. The height of their heights has a certain impact on the shape coefficient of both individual PV components and arrays.

Key words: photovoltaic arrays; wind tunnel test; Computational Fluid Dynamics simulation; shape coefficient; structural loads

---

* **收稿日期**:2023-12-26
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3005305), National Key Research and Development Program (2022YFC3005305)
作者简介:贺佳(1983—),男,湖南长沙人,湖南大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: jiahe@hnu.edu.cn

“十四五”期间,太阳能作为重要的清洁能源备受关注.中央明确提出:加速发展太阳能产业,实现清洁能源占比提升.随着我国新能源战略的稳步推进,光伏能源以其低成本、高环保、维护简易等优点迎来了快速发展.现有光伏阵列可达数百排,单排长度可突破70 m.对于近地面光伏阵列,各排之间遮挡效应明显,且光伏支架的实际高度大多低于5 m,并未达到规范中要求考虑梯度风的高度(5 m).抗风设计是光伏结构设计的重要部分,其中风荷载的准确评估和取值尤为关键.现有设计大多根据我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)[1]和《光伏支架结构设计规程》(NB/T 10115—2018)[2]的相关规定,直接利用不同粗糙度类别模拟平均风速剖面及湍流度剖面,但对于高度小于5 m的风剖面及湍流度剖面取值情况未作讨论.此外,规范未针对多排光伏阵列风荷载遮挡效应的取值给出明确界限,不能在确保经济性的前提下,满足多排光伏阵列的实际应用需求.

近年来,国内外学者已对光伏板风荷载体型系数开展了相关试验研究和理论分析.例如,针对单个光伏板,研究人员探讨了不同底部阻塞率[3]、草原地貌[4]、光伏板端部开口[5]、女儿墙[6-7]等对光伏板风荷载的影响,结果表明,来流方向的遮挡会显著影响光伏板的体型系数分布规律.Shademan等[8]运用计算流体力学模拟方法分析了光伏板在不同方位角和倾斜角条件下风载荷的影响,发现光伏板翼缘处为受荷关键部位,整个结构在0°和180°风向角时承受的风载荷最大.马文勇等[9]利用测压风洞试验揭示了单个光伏板表面风压系数分布规律,提出3种不同的风荷载分布模型.对于光伏阵列而言,由于存在遮挡效应,不同位置处的光伏板风荷载取值与单块光伏板差异较大.庄圣成等[10]、吴永忠等[11]以及Warsido等[12]对地面和屋顶太阳能阵列进行了风洞试验,发现随着光伏组件的间距增加,光伏板的倾覆力矩和体型系数呈下降趋势.Stathopoulos等[13]通过试验分析了平屋顶上光伏板阵列周围的风速特性,发现后排光伏板承受更大的风吸力,屋顶高度对光伏阵列风荷载的影响较小.Agarwal等[14]和Jubayer等[15]对光伏阵列风载荷的升力和阻力系数进行了数值研究,结果显示,在所有风向上,第1排光伏板的阻力和升力值最大.Aly等[16]通过试验和数值模拟方法研究了光伏板在不同几何尺度下的空气动力学特性,指出频谱特征和几何尺度对峰值载荷有影响,而模型尺寸对平均载荷的影响则不明显.Yu[17]基于CFD研究了光伏板不同的长宽比、倾斜角以及地面间隙对风荷载的影响,研究发现,当倾斜角增大时,太阳能电池板的风升会增大,而离地面的间隙则显示出相反的效果.高亮等[18]研究了不同倾角、间距等对光伏板风荷载体型系数的影响,提出了相应的风荷载计算公式.Chevalier等[19]、Cao等[20]对屋面顶部的光伏阵列进行了风洞试验,发现屋面第1排光伏板对后方的光伏板产生较明显的遮挡效应.孙光华[21]采用风洞试验及数值模拟对光伏阵列遮挡效应进行研究,发现不同湍流模型模拟的下游光伏板体型系数普遍小于试验值.

尽管已经有学者对光伏阵列风荷载的规律进行了探索,并获得了显著的成果.但关于近地面光伏阵列的影响因素和干扰效应较多,诸如光伏板不同的离地高度、阵列数等对遮挡效应均有影响.因此,本文利用刚性模型测压风洞试验,分别研究了不同的离地高度、遮挡排数、风向角、光伏板倾角对光伏阵列风荷载体型系数取值的影响,并提出了下游光伏板体型系数的取值建议,为设计人员提供参考.

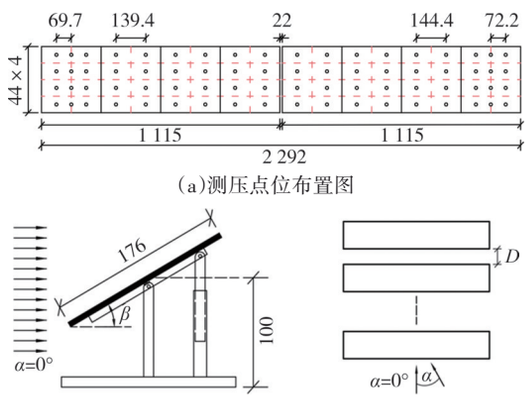
1 风洞试验

本次风洞试验在湖南大学风工程试验研究中心HD-2大气边界层风洞低速试验段进行.低速试验段长15 m,宽5.5 m,高4.4 m,最大风速可超15 m/s,背景湍流度小于2%,试验流场风速通过皮托管和扫描阀进行测量.

1.1 试验模型

原型光伏组件为平单轴跟踪式光伏组件,单排光伏组件长64.172 m,宽4.933 m,高2.8 m,模型缩尺比为1∶28,缩尺后模型与原型在外形上保持几何相似,长、宽、高分别为2 292、176、10 mm,受测压管道的安装限制,光伏板厚取4 mm.光伏板模型在保证刚度的前提下采用ABS工程塑料制作,整个模型由测压面板、立柱、转轴以及支撑底板组成,在测压面板上下表面对称布置测压点,单个光伏板有72个测压位置,共144个测压点,具体布置如图1(a)所示.图1(b)为光伏模型侧立面图,模型可绕立柱沿着竖

直平面进行转动以调整倾角,试验时将光伏组件刚性模型放置在转盘中心,通过旋转转盘模拟不同风向角. 图 1(c)为 9 排光伏阵列模型,其中 α 为风向角,β 为光伏板倾角,本文以工程设计中光伏组件地面覆盖率(Ground Covering Rate, GCR)为依据,通常取 GCR=0.4,故结合缩尺比将光伏阵列之间间距设置为 D=0.26 m.



(a)测压点位布置图

(b)测压模型侧立面图　(c)多排光伏阵列测压模型布置图

图 1　试验模型及参数定义(单位:mm)

Fig.1　Experimental model and parameter definition (unit:mm)

1.2　试验工况

本次试验的风场采用低湍流度均匀流场,来流平均风速为 8 m/s. 试验采用 PSI 公司的电子式压力扫描阀系统,风压采样频率为 330 Hz,对于单个工况采样时间取 60 s.

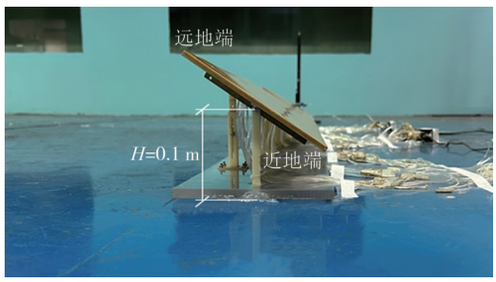
对于单排光伏组件风洞试验,考虑离地高度 H 分别为 0.1、0.4 m,风向角 α 取值范围为 0°~180°,以 10° 为增量,光伏板倾角 β 取值范围为 15°~60°,以 15° 为增量;对于多排光伏阵列风洞试验,考虑离地高度 H 分别为 0.1、0.4 m,风向角 α 考虑 0° 和 180° 分别对应光伏板正面迎风和背面迎风,倾角 β 取值范围考虑 15°~60°,以 15° 为增量,上游遮挡的排数分别取 1~8 排,即测压模型对应分别位于第 2~9 排,考虑不同位置处模型的遮挡效应. 图 2(a)~(d)分别给出了单排光伏组件和多排光伏阵列不同离地高度的试验模型照片.

1.3　参数定义

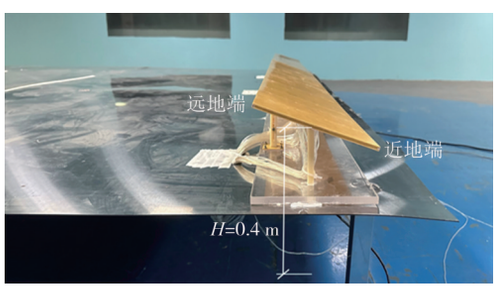
在空气动力学中,物体表面的压力通常用无量纲的风压系数 C_{pi} 表示,如式(1)所示:

$$C_{pi}=\frac{P_{ui}-P_{di}}{P_0-P_\infty}=\frac{P_{ui}-P_{di}}{0.5\rho U^2} \tag{1}$$

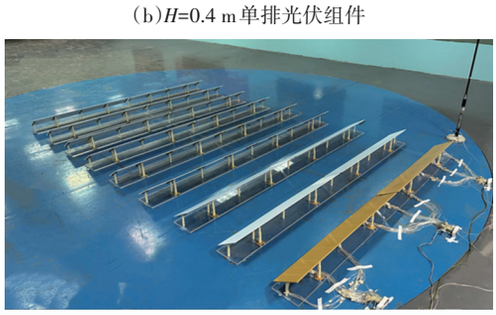
式中:C_{pi} 为单个测点的压力系数;P_{ui} 和 P_{di} 分别为测点 i 处正、反面的风压值;P_0 和 P_∞ 分别为试验时参考点处的总压和静压,总压等于静压与动压($0.5\rho U^2$)之和,其中,ρ 为空气密度,U 为参考点处风速. 本文参考点取模型柱高位置处,即对于不同的离地高度,参考点高度分别为 0.1 m 和 0.4 m.



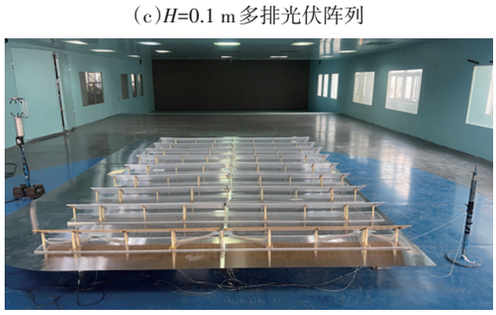
(a)H=0.1 m 单排光伏组件



(b)H=0.4 m 单排光伏组件



(c)H=0.1 m 多排光伏阵列



(d)H=0.4 m 多排光伏阵列

图 2　跟踪式光伏支架测压模型

Fig.2　Pressure measurement model of tracking PV arrays

光伏板上风压系数不均匀分布会使中心轴承受风荷载的扭矩作用,根据光伏板各测点的风压系数及其控制面积,光伏板整体体型系数及扭矩系数定义如下:

$$\mu_s=\frac{\sum_{i=1}^{n}C_{pi}A_i}{A} \tag{2}$$

$$C_{\mathrm{mx}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}C_{\mathrm{pi}}A_i y_i}{AB} \tag{3}$$

式中:μ_s为单个光伏板整体体型系数;A_i为测点i对应的控制面积;A为光伏板的总面积;C_{mx}为扭矩系数;y_i为测点i距离光伏板中心转轴的距离;B为光伏板的宽度.

2 试验结果分析

2.1 单排光伏组件风荷载分布特性

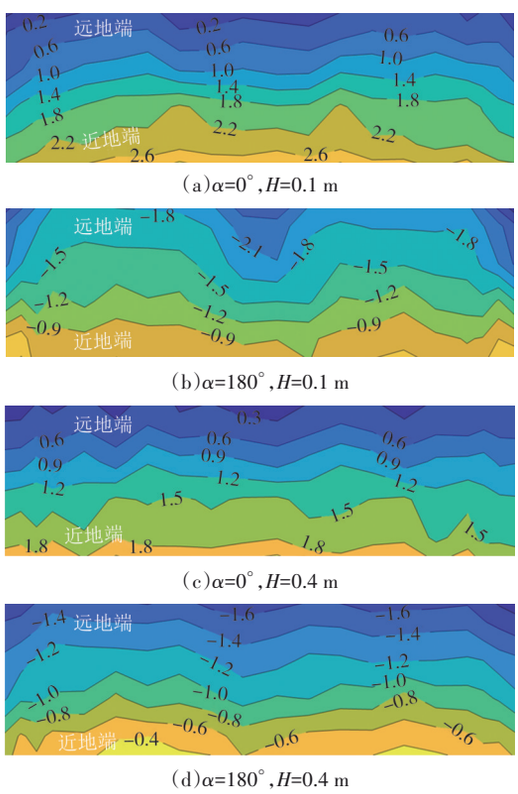
2.1.1 风压系数分布规律

在跟踪式光伏支架结构设计中,光伏板风压系数的分布决定了光伏板对主梁的扭矩大小,是关键设计参数之一.因此,本节首先讨论风压系数的分布特点.在单排光伏组件刚性模型测压风洞试验中,对试验中测量出的各测点风压系数进行计算和分析,得到了光伏板表面的平均风压系数的分布特性.由于光伏板倾角工况较多,受文章篇幅限制,且光伏板在不同的倾角下,虽然风压系数数值大小有所不同,但是其分布规律、分布特点具有相似性,故本节仅以倾角β=15°为例进行讨论.

图3给出了β=15°时光伏板在不同工况下(风向角α=0°、α=180°,离地高度H=0.1 m、H=0.4 m)的风压系数等值线图.从图3可以看出,光伏板的风压系数沿长度方向左右对称;沿宽度方向表现出明显的梯度变化,光伏板近地端和远地端风压差异较大,表现出分层分布的特点,近地端风压系数高于远地端风压系数,这是由于近地端光伏板与地面之间形成狭小地带产生了“挤压”效应,导致风压上升,而远地端来流风在光伏板边缘处更易发生气流分离和漩涡脱落.当风向角α=0°,即光伏板正面迎风时,光伏板表面风压系数均为正,结构整体受到风压力,光伏板风压系数从远地端到近地端逐渐增大,这种风压分布使得光伏板对跟踪支架的主梁产生明显的扭矩效应.当风向角α=180°时,风压系数为负,结构整体受到风吸力,与正面迎风相反,光伏板风压系数的绝对值从远地端到近地端逐渐减小,通过对比可以发现光伏板近风端(靠近来流风一侧)的风压更大,这是因为来流风经过光伏板前端后发生气流分流现象,且风沿着光伏板表面的流向也发生了改变,导致光伏板远风端所受的风荷载降低.

从图3可观察到风压系数在中间位置会出现小幅度下降现象,这是由于光伏板边缘位置会产生风压降低的现象,而测压模型在中间位置同样存在22 mm的间隙,此位置处也会出现风压降低的现象,并且在180°风向角下,该下降趋势会更为明显.风向角α=0°的光伏板风压系数分布趋势相较于α=180°时更平缓,这是由于背面迎风时,来流风经过模型会受到下表面的柱子及测压管的干扰,从而影响光伏板的风压分布情况.

此外,从图3可以看出,对于不同的离地高度,即当H=0.1 m和H=0.4 m时,光伏板风压系数变化趋势相似.但当H较小时,近地端的光伏板风压系数会更大,这是由于此时近地端的“挤压”效应更为明显,导致此处流速加快,风压增大.



(a)α=0°,H=0.1 m

(b)α=180°,H=0.1 m

(c)α=0°,H=0.4 m

(d)α=180°,H=0.4 m

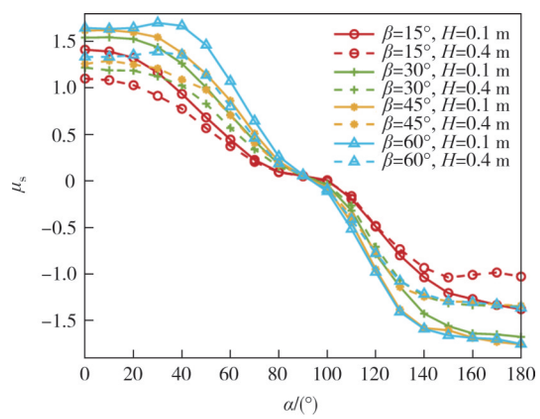
图3 光伏板15°倾角下平均风压系数等值线图

Fig.3 Isoline graph of wind pressure coefficients for photovoltaic at an inclination angle of β=15°

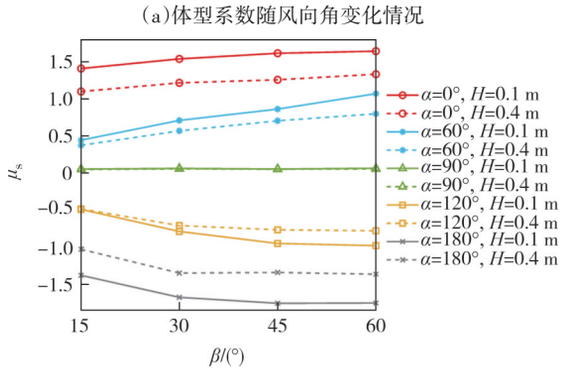
2.1.2 整体体型系数分布规律

通过光伏板的整体体型系数,可计算出作用于光伏组件的整体风荷载值,以用于主梁、柱子等主要构件的结构设计.不同的离地高度可能导致光伏板整体体型系数的变化,因此,本节讨论了H=0.1 m和H=0.4 m时,单排光伏组件整体体型系数的差异性.

图4给出了这两种高度下光伏板整体体型系数随倾角β和风向角α的变化情况.从图4(a)中分布可以看出,当风向角α在0°~90°范围内时,光伏板体型系数为正,表现为风压力,且随着倾角β的减小逐渐减小;当风向角α在90°~180°范围内时,结果则恰好相反.其中,当风向角处于40°~140°时,体型系数变化较快,其他角度区间内则相对平缓,这是因为体型系数与迎风方向风荷载作用在光伏板上的投影面积密切相关,而在此区间内,投影面积的变化迅速,因此体型系数也随之迅速变化.此外,对于单排光伏组件,0°和180°风向角被视为风荷载的最不利风向角.



(a)体型系数随风向角变化情况



(b)体型系数随倾角变化情况

图4　单排光伏组件体型系数变化趋势

Fig.4　Trend in shape coefficient variation for single-row PV module

以典型的风向角0°、60°、90°、120°和180°为例,图4(b)给出了不同离地高度下,光伏板体型系数随倾角的变化情况.从图4(b)可以看出,风向角相同而离地高度不同时,光伏板的体型系数变化趋势相似,但数值大小存在差异.通过数据分析发现,H=0.1 m的光伏板体型系数绝对值最大可达H=0.4 m的1.3倍,这是由于光伏板近地端离地越近,来流风分流和挤压现象更显著.此外,从图4(b)还可发现,光伏板倾角越小,其体型系数绝对值越小,风向角α越接近90°,离地高度对体型系数的影响也越小,这是由于来流风作用在光伏板表面的投影面积减小.

2.1.3　扭矩系数分布规律

光伏板上风压系数的不均匀分布会导致光伏结构的不同构件承受一定的扭矩作用,且这种不均匀性会随着风向角、光伏板倾角及离地高度的变化展现出一定的差异性,故本节重点讨论风荷载在光伏板中心轴处所产生的扭矩作用.图5给出了单排光伏组件在不同离地高度和倾角下,扭矩系数随风向角的变化情况.当风向角α在0°~90°范围内时,光伏板扭矩系数随着风向角的增大而逐渐减小;当风向角α在90°~180°范围内时,扭矩系数随着风向角的增大整体表现出增大的趋势,但不同倾角下的变化规律不同,例如当β=15°时,扭矩系数随着风向角的增大呈现先增大后减小的趋势,在α=150°时达到最大值,而当β≥45°时,扭转系数的最大值则在α=120°时出现.由此可见,光伏板扭矩系数会在不同风向角下取得极值.对于不同的离地高度,扭矩系数变化规律相似而数值大小略有不同,当β≤45°时,近地端的光伏板扭矩系数会更大,而当β=60°时,远地端的光伏板扭矩系数会略大于近地端.

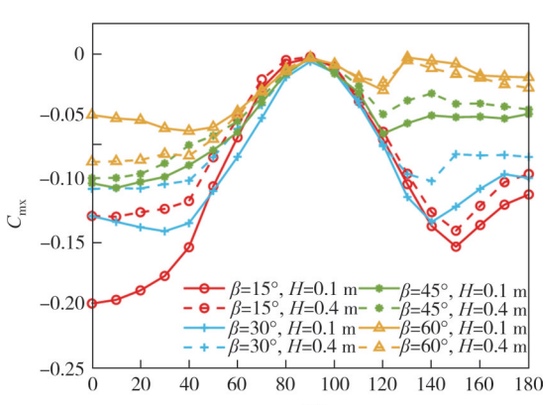


图5　单排光伏组件扭矩系数变化趋势

Fig.5　Trend in moment coefficient variation for single-row PV module

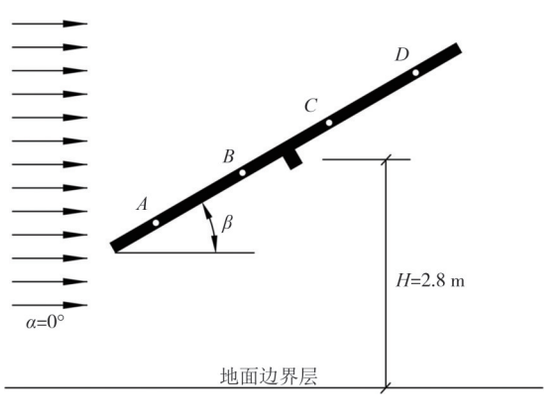
此外,扭矩系数随着倾角的增大而减小,这是因为扭矩系数的大小不仅与风压值有关,同时也与风压合力作用中心到中心轴的距离有关.当倾角增大时,尽管风压合力值在增加,但合力作用中心与中心轴的间距在减小,从而导致扭矩系数减小.这种变化

趋势使得光伏板的最不利风压和最不利扭矩不会同时出现.因此,在进行光伏结构设计时,宜分别考虑两种最不利状态下的荷载效应.

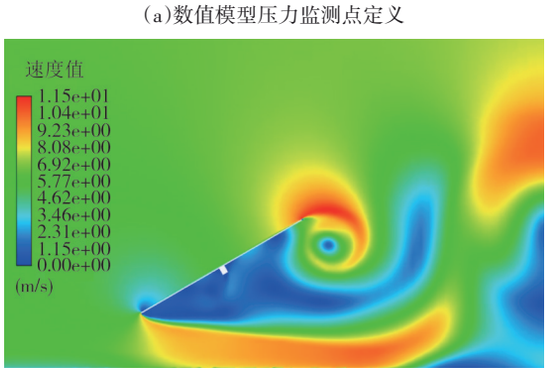
2.1.4 CFD模拟对比

为了进一步加深对风压分布规律的理解,验证风洞试验结果的可靠性,通过参考相关文献[17, 21],对单排光伏组件的二维模型进行了CFD模拟计算.首先,利用ANSYS ICEM CFD有限元软件对光伏板进行建模和网格划分,随后将其导入Fluent中进行数值风洞模拟计算.模拟中,针对不同倾角的光伏板,采用与试验一致的均匀流,同时选择SST k-ω 湍流模型进行风场特性模拟,模型采用足尺建模,CFD模拟的工况为 α=0°,β=15°~60°,H=0.1 m,并与风洞试验结果进行对比.数值模型上布置了与风洞测压模型位置相同的压力监测点,模型的压力监测点具体定义如图6(a)所示,其中监测点之间间距为0.25倍板宽.在模拟过程中已经做时间无关性和网格无关性验证.图6(b)和6(c)分别为β=30°时光伏板正向迎风的风速云图和风压云图,由图可以看出,光伏板远地端尾部发生漩涡脱落现象,从而导致光伏板边缘风压呈现降低的趋势.

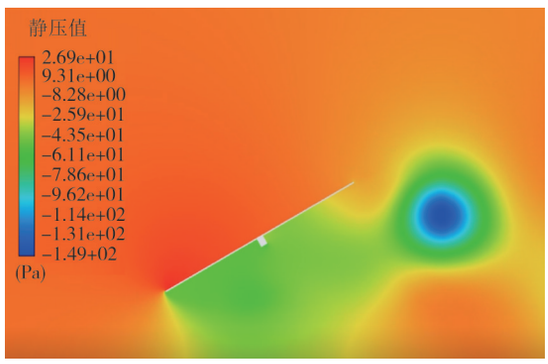
图7(a)展示了光伏板风洞试验和数值模拟的整



(a)数值模型压力监测点定义



(b)α=0°,β=30°风速云图



(c)α=0°,β=30°风压云图

图6 单排光伏组件二维风洞模拟

Fig.6 2D wind tunnel simulation of single-row PV module

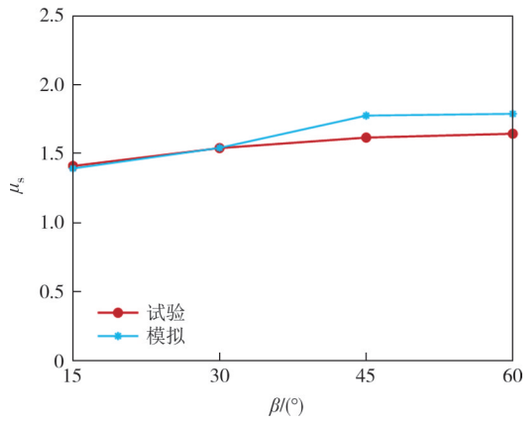
体体型系数随倾角变化的情况,由图7(a)可知,光伏板的整体体型系数随着倾角β的增大而逐渐增大,这是由于随着β增大,光伏板的受力面积逐渐增加,光伏板所受风压也增大,无论是风洞试验还是CFD模拟均呈现出这一趋势.其中倾角为15°和30°的拟合效果较好,但随着倾角进一步增大,实测值与模拟值的偏差有所增加,偏差最大达到8.97%.这主要是由于随着倾角增大,风洞试验中近地端离地越近,受近地面紊流度的影响越大.

图7(b)给出了不同倾角下风洞试验和CFD模拟的测压点风压系数对比图,其中横坐标点位A靠近近地端,点位D靠近远地端.从图7(b)可以看出,近地端风压系数较大,这一现象与图6(c)的压力云图吻合,即光伏板近地端上下表面压力差较远地端更大,故近地端风压系数更大.模拟和试验的压力监测点风压系数分布规律均呈现出线性分布规律,且不同倾角下模拟与试验的风压系数变化趋势基本一致,这表明数值风洞模拟效果良好.此外,研究还发现不同倾角下的光伏板风压系数可以采用梯形分布方式来表示,进一步验证了贺广零等[22]关于光伏板风荷载梯形分布的合理性.因此对于大部分光伏板设计,采用梯形分布模型不仅可以有效地描述光伏板的风荷载取值,也可以近似描述光伏板表面的体型系数分布情况.

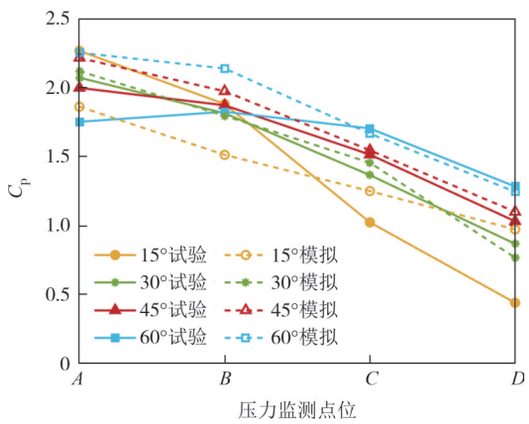
2.2 多排光伏阵列风荷载遮挡效应

2.2.1 光伏阵列体型系数及风压系数分布规律

本节以最不利风向角0°和180°为例,对多排光伏阵列风荷载体型系数及遮挡效应开展风洞试验研究,同时,探讨了不同离地高度,即H=0.1 m和H=



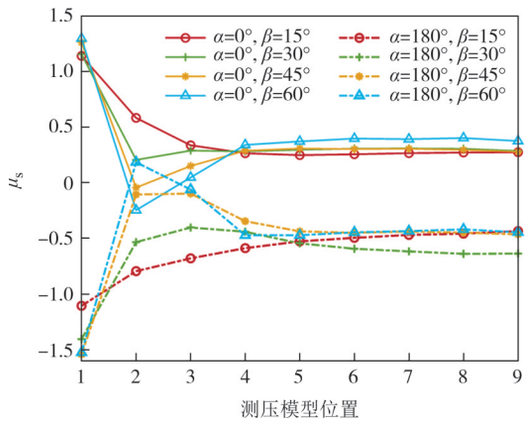
(a)模拟与试验体型系数对比



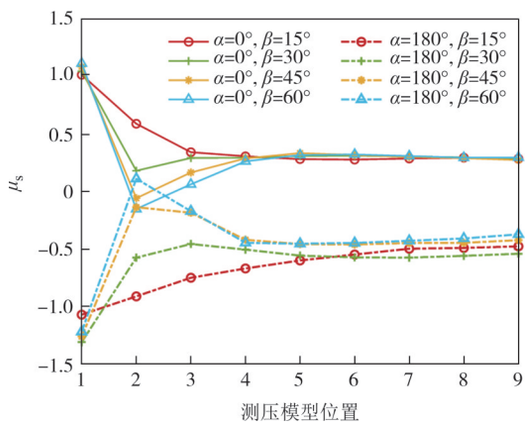
(b)模拟与试验的测压点风压系数对比

图 7　单排光伏组件风洞试验和数值风洞模拟对比

Fig.7　Comparison between wind tunnel experiment and CFD for single-row PV module



(a)H=0.1 m



(b)H=0.4 m

图 8　不同离地高度光伏阵列体型系数变化情况

Fig.8　Variation in the shape coefficient of PV arrays at different heights above ground

0.4 m 对试验结果的影响,光伏阵列间距为固定值 0.26 m,体型系数变化曲线如图 8 所示.

图 8 中,横坐标代表光伏组件测压模型所在的排数,如横坐标 9 表示的是测压模型位于第 9 排,意味着其上游有 8 排模型形成遮挡. 从图中不难看出,对于多排光伏阵列而言,不同的离地高度对光伏板体型系数依然存在影响,其中第 1 排光伏组件受到的影响最大,表现为离地近的光伏板体型系数较大,相同工况下 H=0.1 m 的光伏板体型系数绝对值最大可达 H=0.4 m 的 1.26 倍,该结果与 2.1 节中单排光伏组件的结果相似. 而后排光伏组件受到的影响较小,表现为离地近的光伏板体型系数为离地远的 1.10 倍左右,其原因在于,对于多排光伏阵列,后排光伏板的体型系数受遮挡效应的影响最大,同时风场也会受到前排光伏组件柱子的干扰,从而削弱了离地高度对后排光伏组件的影响,但仍呈现出离地近的光伏板体型系数较大的趋势. 当光伏组件位于第 1 排时,不存在遮挡,光伏板体型系数的绝对值最大,以 β=45°、H=0.4 m 为例,该工况下第 1 排光伏板的体型系数在风向角为 0°和 180°时分别为 1.120 和−1.261. 若测压模型位于第 2 排,受第 1 排光伏板遮挡效应的影响,第 2 排光伏板的体型系数大幅下降,分别减小至−0.055 和−0.134. 第 4 排至第 9 排光伏板体型系数分别在 0.30 和−0.42 上下波动,基本保持稳定. 当倾角 β 较小(如 β=15°)时,随着前排遮挡的增加,体型系数逐渐减小并趋于稳定,当倾角 β 较大(如 β=60°)时,体型系数呈现出先减小,再小幅增加,最后趋于稳定的变化趋势,这是因为大倾角下光伏板对流场的影响程度更大,使得上游光伏板对下游光伏板的干扰效应更加显著. 同时可以注意到,倾角为 45°和 60°时,第 2 排光伏板的体型系数会出现负值,这表明在大倾角下,第 1 排光伏板对风场的改变使得第 2 排光伏板受到相反方向的风荷载作用,从而产生较小的风吸力.

综上所述,光伏阵列中第1排光伏板体型系数的绝对值最大,第2排的体型系数受遮挡效应影响波动最大,体型系数大幅下降,倾角越大,遮挡效应越明显.同时,随着上游光伏组件排数的增加,这种遮挡效应逐渐趋于稳定,可以认为从第4排开始,遮挡效应基本保持稳定,稳定后光伏板体型系数的下降幅度最大可达到第1排光伏板的21.9%.

为进一步了解多排光伏阵列表面的风压分布情况,图9展示了α=0°、β=30°、H=0.4 m工况下各排光伏组件的平均风压系数等值线图.从图9可以看出,第1排光伏板的风压系数分布与2.1节中的梯形分布相吻合.而第2排光伏板受到前排遮挡影响,风压系数发生了显著变化,除了左右两侧,中心区域的风压系数降至0.20~0.40之间,风压分布也不再遵循梯度分布规律.第4排及其后的风压系数分布规律与第3排基本一致,可认为前排对后排的影响从第4排开始逐渐稳定.由图9可见,从第2排光伏组件开始,光伏板下部左右两端位置出现较大的正压区域,此区域的风压系数最高可达1.60,这是由于前排光伏板的干扰导致后排光伏板下部两端发生气流分离现象的程度远高于其他区域,风压系数等值线在该区域分布较为密集.后排光伏板的中心区域位于前排光伏板迎风面的正后方,由于前排光伏板对来流风的遮挡明显,因此中心区域的风压系数较小.通过对比不同位置处光伏组件的风压分布情况,发现后排光伏板中心区域的体型系数变化较小,上游光伏板对下游光伏板的干扰影响主要体现在光伏板的下部左右两端位置.

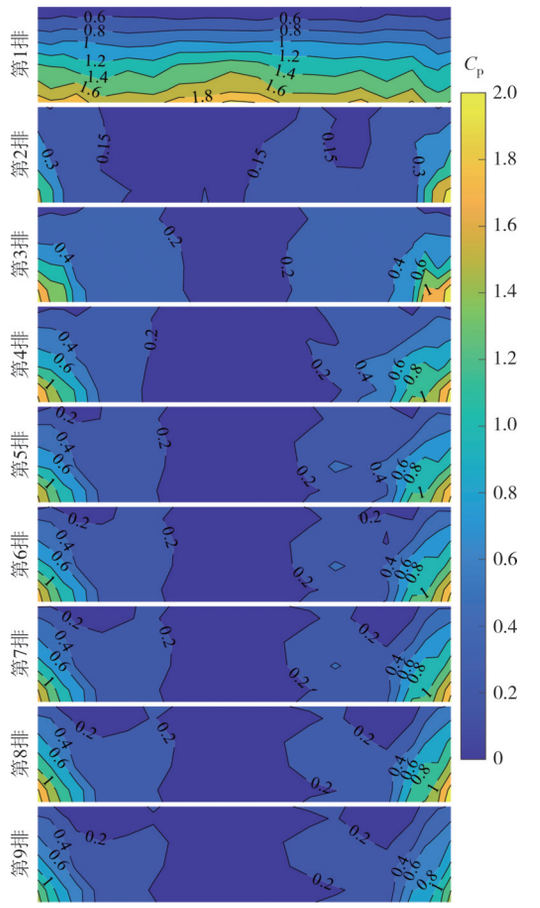


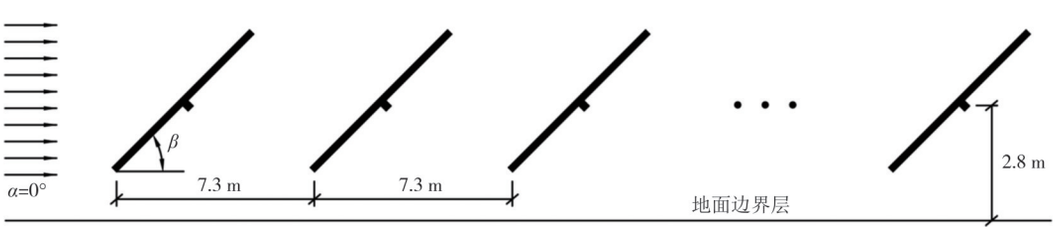
图9 α=0、β=30°、H=0.4 m工况下的光伏阵列等值线图

Fig.9 Isoline map of the PV arrays under the condition of α=0°, β=30°, H=0.4 m

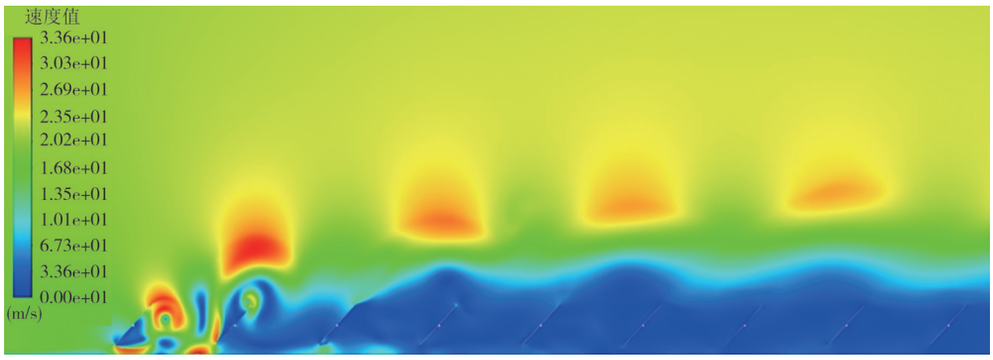
2.2.2 CFD模拟对比

为了对比验证,本节同样对多排光伏阵列开展了CFD模拟研究.数值模拟中光伏阵列前后排间距及离地高度的定义如图10(a)所示,对比风洞试验工况为风向角α=0°、倾角β=15°~60°、离地高度H=0.1 m的光伏阵列,数值模拟中的来流风速为20 m/s,已完成时间无关性和网格无关性验证.

以β=45°为例,其光伏阵列的风速云图和风压云图分别如图10(b)(c)所示.可以看出,第1排光伏板的上下表面压力差最大,这也意味着第1排光伏板的体型系数最大.第2排光伏板上表面风压小于下表面,因此将出现第1排光伏板的体型系数为负值的情况.从第3排开始,光伏板上表面风压略大于下表面,导致第3排之后的光伏板体型系数呈现较小的正压.前排光伏板对后排光伏板的遮挡效应从第4排开始逐渐稳定,这些变化趋势与风洞试验结果吻合.



(a)多排光伏阵列布置示意图



(b)多排光伏阵列风速云图(β=45°)



(c)多排光伏阵列风压云图(β=45°)

图 10　光伏阵列二维风洞模拟

Fig.10　2D wind tunnel simulation of PV arrays

图 11 对比了多排光伏阵列风洞试验结果和 CFD 模拟结果,从图 11 可以看出,两者变化趋势一致. 体型系数在第 1 排位置处最大,表现为风压力. 倾角越大,后排受到前排的遮挡效应越显著. 在倾角为 45°和 60°时,第 2 排光伏板的体型系数均表现为负值. 随着上游排数的增加,遮挡效应趋于稳定,风洞试验和 CFD 模拟均显示,第 4 排及其后的光伏板的体型系数整体变化较小,并且倾角越大,遮挡效应导致的体型系数减小的幅度越大,最大可达到 −19.1%. 因此,在实际工程中,多排光伏阵列的风荷载计算和结构设计宜考虑遮挡效应的影响.

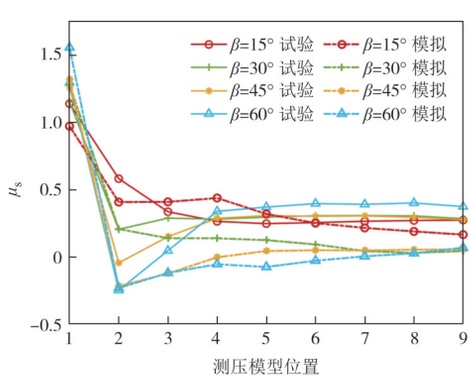


图 11　光伏阵列风洞试验和数值风洞模拟对比

Fig.11　Comparison between wind tunnel experiment and CFD for PV arrays

3　结 论

通过跟踪式光伏支架刚性模型风洞测压试验及其 CFD 模拟分析,本文研究了近地面单排光伏组件及多排光伏阵列的平均风压系数及体型系数变化规律,并对不同的离地高度、遮挡效应进行了分析,得出以下结论.

1)对于单排光伏组件,表面风压系数呈梯形分布,近地端风压系数较大,远地端风压系数较小. 随着光伏板倾角的增大,其体型系数随之增大,扭矩系数随之减小;随着风向角的增大,体型系数和扭矩系数的绝对值呈现先减小后增加的趋势,最不利风向角出现在 0°和 180°附近. 此外,离地高度对光伏板体型系数的影响显著,离地高度为 0.1 m 的光伏板体型系数,其绝对值最大可达离地高度为 0.4 m 的 1.3 倍.

2)对于多排光伏阵列,第 1 排因其前方无任何遮挡,风压分布与单排光伏组件相似,呈梯形分布. 第 2 排受第 1 排遮挡效应的影响尤为显著,其体型系数明显减小,第 4 排及其后的体型系数趋于稳定. 倾角越大,遮挡效应越显著,遮挡效应导致的体型系数的降幅可达 −19.1%,即大倾角下第 1 排光伏板对风

场的改变使得第2排光伏板受到相反方向的风荷载作用.在0°与180°两个最不利风向角下,遮挡效应对光伏阵列的影响相似.

3)多排光伏阵列的体型系数同样会受到离地高度的影响,其中第1排光伏组件受到的影响最显著,即H=0.1 m的光伏板体型系数绝对值最大可达H=0.4 m的1.26倍.而后排光伏组件受到离地高度的影响则较弱,H=0.1 m的光伏板体型系数平均值为H=0.4 m时的1.10倍左右.

参考文献

[1] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[2] 光伏支架结构设计规程:NB/T 10115—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2018.
Code for design of photovoltaic modules support structures: NB/T 10115—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese)

[3] 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.
MA W Y, CHAI X B, LIU Q K, et al. Study on effect of bottom flow obstruction on wind load of solar photovoltaic panels [J]. Building Structure, 2019, 49(2): 129-134. (in Chinese)

[4] 钟旻,龙浩楠,周占学,等. 基于风洞试验的草原地貌太阳能光伏板抗风措施研究[J]. 自然灾害学报,2023,32(3): 64-73.
ZHONG M, LONG H N, ZHOU Z X, et al. Wind load study of solar photovoltaic panels in grassland terrain based on wind tunnel test[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(3): 64-73. (in Chinese)

[5] 李寿科,李寿英,陈政清. 太阳电池板风荷载试验研究[J]. 太阳能学报,2015,36(8):1884-1889.
LI S K, LI S Y, CHEN Z Q. Experimental investigation of wind loading of solar panels[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(8): 1884-1889. (in Chinese)

[6] 龚敏,欧添雁. 单个屋面光伏组件风载体型系数风洞试验研究[J]. 安徽建筑,2015,22(6):183-184.
GONG M, OU T Y. Research on wind tunnel test of shape coefficient of wind load for photovoltaic module with single roof[J]. Anhui Architecture, 2015, 22(6): 183-184. (in Chinese)

[7] 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.
ZHANG X S, LI D, WU X G, 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. (in Chinese)

[8] SHADEMAN M, HANGAN H. Wind loading on solar panels at different inclination angles [C]//The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering. North Carolina, USA. 2010.

[9] 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.
MA W Y, SUN G J, LIU X B, et al. Tests for wind load distribution model of solar panels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 8-13. (in Chinese)

[10] 庄圣成, 李寿科, 刘敏. 平屋面双坡板式光伏阵列风荷载特性[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(5): 9-12.
ZHUANG S C, LI S K, LIU M. Wind load characteristics of flat roof double slope photovoltaic array[J]. China Construction Metal Structure, 2023, 22(5): 9-12. (in Chinese)

[11] 吴永忠, 邹立珺. 光伏电站太阳能电池阵列间距的计算[J]. 能源工程,2011(1): 39-40.
WU Y Z, ZOU L J. The calculation of spacing between solar cell array in photovoltaic pouler station[J]. Energy Engineering, 2011(1): 39-40. (in Chinese)

[12] 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.

[13] STATHOPOULOS T, ZISIS I, XYPNITOU E. Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 125: 195-206.

[14] AGARWAL A, IRTAZA H, ZAMEEL A. Numerical study of lift and drag coefficients on a ground-mounted photo-voltaic solar panel[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(9): 9822-9827.

[15] JUBAYER C M, HANGAN H. A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 153: 60-70.

[16] ALY A M, BITSUAMLAK G. Aerodynamics of ground-mounted solar panels: test model scale effects [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 250-260.

[17] YU Y. Numerical simulation of wind load on roof mounted solar panels[D]. Windsor: University of Windsor, 2012.

[18] 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 lode of pv module[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(8): 1931-1937. (in Chinese)

[19] CHEVALIER H L, NORTON D J. Wind loads on solar collector panels and support structure [R]. Texas A&M University, Aerospace Engineering Department, 1979.

[20] CAO J X, YOSHIDA A, SAHA P K, et al. Wind loading characteristics of solar arrays mounted on flat roofs[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 214-225.

[21] 孙光华. 不规则光伏板阵列群风荷载体型系数研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
SUN G H. Study on wind load structural shape coefficient of irregular photovoltaic array [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)

[22] 贺广零,蒋华庆,单建东,等. 光伏方阵风荷载模型研究[J]. 电力建设,2012,33(10):5-8.
HE G L, JIANG H Q, SHAN J D, et al. Research of wind load model in photovoltaic array [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(10): 5-8. (in Chinese)