DOI:10.14188/j.1671-8844.2023.0486
文章编号:1671-8844(2026)09-1478-08

考虑屋面附属结构的高支架光伏阵列风荷载特性研究

李俊龙[1],邵林媛[2],徐海巍[2],余锦睿[2]

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122;
2. 浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘要:为研究存在附属结构干扰的某典型真实屋面下高支架光伏阵列风荷载特性,开展风洞测压试验分析了屋面附属结构干扰对光伏电站不利风压分布的影响及女儿墙高度对屋面高支架风压取值的影响,并与现行规范进行了比较。结果表明:相比理想平屋面上的低矮支架阵列,屋面高支架光伏阵列在近檐口迎风区的负风吸力将会大幅增加;屋面附属结构的气动干扰将会导致光伏阵列局部区域产生较大的正风压力;女儿墙高度增加对靠近檐口处的光伏阵列的风吸力优化效果显著;光伏阵列的最不利吸力出现在靠近檐口光伏阵列的两个角部区,最不利正风压出现在屋盖北侧靠近设备间的阵列位置,采用现行规范基于地面电站风荷载取值进行设计可能会低估屋面高支架光伏电站的不利风吸力。

关键词:分布式光伏阵列;屋面附属设施;风洞试验;高支架;体型系数
中图分类号:TU 312.1　**文献标志码:**A

Study on wind load characteristics of high-bracket photovoltaic arrays with roof ancillary components

LI Junlong[1], SHAO Linyuan[2], XU Haiwei[2], YU Jinrui[2]

(1. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to study the wind load characteristics of a typical real roof with interference from accessory structures, a wind tunnel pressure test was carried out to explore the effect of the roof accessory structure interference on the unfavorable wind pressure distribution of the photovoltaic power plant. The influence of parapet height on the wind pressure value of the high bracket PV array mounted on the roof was analyzed and compared with the current specification. The results show that the negative wind suction in the windward area near the eaves of the roof-mounted high-bracket PV array will increase significantly compared to that of a low-height array of photovoltaic panels on an ideal flat roof. The aerodynamic interference from the roof accessory structures will lead to a large positive wind pressures in local areas of the PV array. The increase in the height of the parapet has a significant optimization effect on the wind suction of the PV array near the eaves. The most unfavorable suction of the PV array occurs in the two

收稿日期:2024-04-03
作者简介:李俊龙(1988-),男,高级工程师,主要从事新能源利用研究,E-mail: junlongli1988@163.com。
通信作者:徐海巍(1986-),男,副教授,主要从事工程结构抗风研究,E-mail: haiweix@zju.edu.cn。
基金项目:国家自然科学基金项目(编号:57978614)。



本文引用格式:李俊龙,邵林媛,徐海巍,等.考虑屋面附属结构的高支架光伏阵列风荷载特性研究[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1478-1485.
Citation: LI Junlong, SHAO Linyuan, XU Haiwei, et al. Study on wind load characteristics of high-bracket photovoltaic arrays with roof ancillary components[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9): 1478-1485.

corner areas of the PV array near the eaves, while the most unfavorable positive wind pressure occurs in the array location on the north side of the roof near the equipment room. Designing using the current codes based on ground station wind load values may underestimate the unfavorable wind suction of rooftop high-bracket PV power plants.

Key words: distributed photovoltaic array ; roof ancillary facilities ; wind tunnel test ; high bracket ; shape coefficient

近年来，太阳能光伏产业飞速发展，屋顶光伏电站建设蓬勃发展[1]。屋面光伏系统对风荷载较为敏感，风灾破坏事故时有发生，对人员生命和财产安全产生了不利影响。已有学者对屋面光伏电站的风效应展开了研究，BRONKHORST 等[2]应用风洞试验和数值模拟的方法研究了风向角和光伏板位置的改变对理想平屋面光伏板风荷载特性的影响，得到光伏板的整体压力分布情况；王京学等[3-4]利用同步测压试验研究了平屋顶上光伏面板净风压值，同时分析了建筑物长宽比、高宽比对光伏面板风压分布的影响规律，总结了光伏板等效净风压随附属面积的变化规律；余香林等[5]实测了一幢低层房屋屋顶太阳能光伏板的风压系数；李嘉阳等[6]应用数值模拟方法研究了光伏板组件倾角和光伏板与屋面的间距对光伏板表面风压场的影响；KOPP 等[7-9]对屋面光伏和地面光伏进行了对比，并分析了建筑尺寸、光伏阵列倾角间距等参数对光伏阵列所受风压的影响；YAO 等[10]研究了 2 种光伏板组件倾角对屋面光伏阵列风荷载的影响，发现当光伏组件几乎水平安装在屋顶上（倾斜角小于 10°）时风荷载受倾角的影响较小；BROWNE 等[11]和 CAO 等[12]研究了女儿墙对屋顶光伏阵列风荷载的影响，发现增加女儿墙高度会增加作用在阵列上的峰值风荷载，女儿墙对来流风起阻挡作用，进而形成了角部漩涡，对屋面光伏板上的风荷载产生了很大影响；WANG 等[13]的试验结果表明，临界正净压力系数随着女儿墙高度的增加而减小，有女儿墙的建筑模型的临界负峰值小于无护栏的建筑模型，此外还研究了对光伏板的局部风压分布和净压力系数的影响；王彩玉等[14]认为当女儿墙高度大约为 0.42 倍的光伏板高度时，其最大负压对应的折减系数可达 50% 以上，随着女儿墙高度继续增加，其对光伏板风荷载的减小效应趋于稳定。

综上所述，以往绝大部分研究都聚焦于理想屋面，未考虑屋面上存在的各类附属结构物。而现实中屋面上往往存在设备间、楼梯间和水箱等各种附属结构，这无疑增加了屋面光伏电站所受气动力的复杂性，风荷载分布特征与典型屋面存在较大差异。为充分利用屋面空间，近年来高支架体系在屋面光伏电站建设中的应用越来越广泛。高支架通常超过女儿墙，距离屋面 2.5～3.0 m，以实现支架下部空间的有效利用。相比传统贴地的矮支架（如距屋面 0.5 m），屋面高支架高度较高且受女儿墙遮挡较少，二者风效应和抗风风险性有明显差异。目前，国内外关于现实中有干扰屋面下的高支架结构风效应研究还未见报道，有必要开展针对性分析。

本文以我国东南沿海台风高发区某产业园区的典型分布式屋面光伏电站为例，开展了高支架光伏结构风荷载特性的风洞试验研究，探索屋面附属结构对光伏电站的不利风荷载分布影响，分析了女儿墙高度对屋面高支架光伏结构风荷载取值的影响，并将研究结果与现有规范进行比较，以期为同类屋面抗风设计提供参考。

1　模型与试验装置

某东南沿海产业园区的分布式屋面光伏发电项目典型建筑长、宽分别为 80、50 m，高约 20.2 m，分布式光伏组件布置在厂房建筑屋顶，建筑平屋顶上设有出屋面的附属结构，包括设备间、楼梯间和水箱等，屋顶光伏阵列布置如图 1 所示。为充分利用屋面空间，屋面光伏支架采用框架式钢结构高支架的形式，光伏支架距离屋顶地面高度为 2.6 m，高出设计女儿墙 1.05 m，光伏组件倾角为向南倾斜 2°。

本次试验在浙江大学的 ZD-1 边界层风洞中完成，风洞截面宽 4 m、高 3 m，最高测试风速可达 55 m/s。根据建筑所在的地形地貌特点，按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》[15]确定其为 B 类地貌，地貌粗糙度指数 β=0.15，所在地的基本风压为 0.60 kN/m^2。

试验模拟的平均风速剖面如图 2 所示，湍流度剖面如图 3 所示。对比图 2、3 可见，平均风速和湍流度的试验值均与各自对应的规范曲线吻合较好。

试验参考点高度处顺风向脉动风速谱与理论Karman谱吻合较好,如图4所示。本文试验流场模拟满足试验要求。

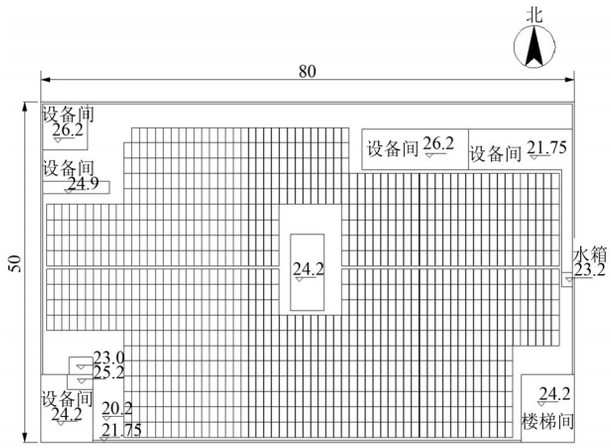


图1 屋顶光伏阵列布置(单位:m)

Fig.1 Roof photovoltaic array layout(unit: m)

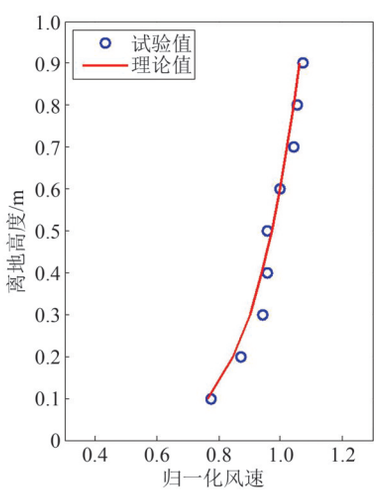


图2 风洞模拟的B类大气边界层平均风速剖面

Fig.2 Wind speed profile of Category B atmospheric boundary layer simulated by wind tunnel

屋顶高支架分布式光伏的试验模型采用ABS工程塑料制作,模型缩尺比例为1∶60,如图5所示。试验风速参考点选在风洞高度约44 cm处,参考风速约为9 m/s,对应于实际高度26.4 m处,25年重现期的10 min平均风速约为32.7 m/s,试验风速比约为1.0∶3.6,时间缩尺比为1.0∶16.7。

对屋面光伏板上下表面布置测压点,得到屋面光伏板所受净风荷载,如图6所示。由图6可见,同一位置点在其上下表面分别布置测压点,A~D的4个测区总计布置448个测点。风洞试验中每隔15°进行1次测试,测压风向角α为0°~345°,共有24个工况,每个风向角下的采样时间约为60 s,采样频率为312.5 Hz。

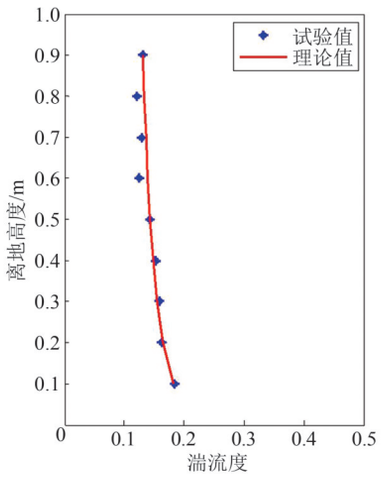


图3 风洞模拟的B类大气边界层湍流度剖面

Fig.3 Turbulence profile of Category B atmospheric boundary layer simulated by wind tunnel

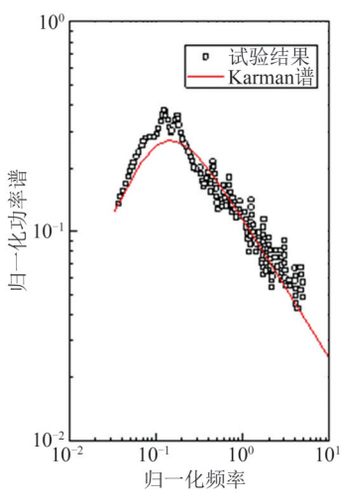


图4 顺风向脉动风速谱图

Fig.4 Downwind pulsating wind speed spectrum



图5 试验模型

Fig.5 Test model

实际光伏支架超出女儿墙高度过多,试验中考虑在原有女儿墙高度上增加风屏障以减少光伏风

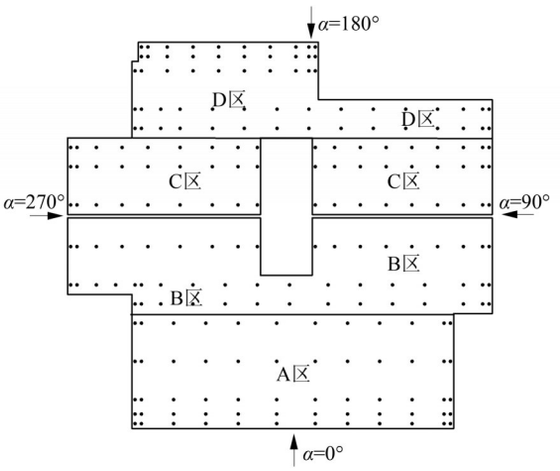


图 6　光伏板测区划分和风向角示意图

Fig.6　Schematic diagram of photovoltaic panel test area division and wind direction angles

荷载，高度设置为 1.05 m，使其与光伏支架处于同一高度。为便于表述，在风洞模型试验中即认为进行了 2 种不同高度女儿墙下的风压研究，具体测试工况如表 1 所示。

表 1　试验工况

Table 1　Test conditions

工况	女儿墙高度/m	风向角/(°)
1	1.55	0～345(间隔 15°)
2	2.60	

本文模型试验中各测点风压系数计算式为

$$C_{pi}=\frac{P_i}{0.5\rho V_{\infty}^2} \tag{1}$$

式中：C_{pi}为建筑物表面某测点 i 的风压系数，当 C_{pi}为正值时光伏板受到的风荷载为压力，当 C_{pi}为负值时光伏板受到的风荷载为吸力；P_i为测点 i 上表面风压减去下表面风压后得到的净风压；ρ 为空气密度；V_{∞}为参考点风速。

为便于设计应用及与规范进行比较，本文采用风荷载体型系数来描述风压的分布。将模型风洞试验测得的风压系数按下式转换成相应的体型系数，该体型系数为建筑物各测点处的局部体型系数，即

$$\mu_i=\left(\frac{z_r}{z_i}\right)^{2\beta}C_{pi} \tag{2}$$

式中：μ_i为建筑物表面某测点 i 的风压体型系数；z_r为试验时参考风速点 r 的高度；z_i为试验时测点 i 的高度；β为 0.15。

2　屋顶分布式光伏风荷载特性分析

2.1　附属结构干扰下屋面高支架光伏阵列的风压分布

对于不考虑其他附属设施的理想平屋面低支架光伏板的风荷载特性，目前已有众多研究成果。表 2 为风向角 α=0°、180°时已有理想平屋面的风压体型系数分布结果[6,8,10]，其中风向角定义与本文类似，即风向角为 0°时光伏板的上表面处于迎风侧，风向角为 180°时光伏板的下表面处于迎风侧。由表 2 可见，对于理想平屋面小倾角组件，不同文献得到的风压体型系数为－0.25～0.20。对于近似平铺的光伏支架组件，其上下表面风压大部分相互抵消，导致净风荷载作用并不明显。

表 2　典型风向下不同文献中理想平屋面光伏阵列风压研究结果

Table 2　Research results of wind pressure of ideal flat roof photovoltaic arrays in different literatures under typical wind directions

文献	模型	风向体型系数	
		0°	180°
李嘉阳等[6]	2°组件倾角	－0.25～0.15	—
KOPP 等[8]		－0.05～0.05	－0.12～0.10
YAO 等[10]	5°组件倾角	－0.20～0.10	－0.10～0.20

注：表中体型系数按照不同文献风压系数折算而来。

女儿墙高度 h=1.55 m 时，存在屋面干扰物的高支架光伏阵列对应 0°和 180°风向下的风压体型系数分布结果如图 7(a)、(b)所示。由图 7(a)可见，0°风向角度时迎风端部组件(A 区)角区和中间区的风压体型系数分别可达－1.10、－0.7～－0.6，沿着来流方向迅速衰减，在尾流区(如 C 和 D 区)形成 0.3 左右的较大正风压体型系数。相比表 2 中理想屋面矮支架情况，高支架光伏阵列在迎风端部的最不利吸力显著增强，由于受附属结构干扰影响，迎风前缘柱状分离涡变强，作用在光伏上表面吸力较大。由图 7(b)可见，180°风向角时迎风端部区(D 区)组件离檐口女儿墙仍有一段距离，脱离了气流分离区，导致其负风压体型系数大多为－0.3～－0.2，尾流区(如 A 区)的正风压体型系数也在 0.2 左右，此时风压取值与表 2 理想平屋面情况的总体取值范围接近。0°、180°风向角时，位于屋面中间区域的光伏组件所受风荷载均不显著。

考虑到斜风向角下气流在屋面分离的复杂性及其对屋面附属结构的潜在干扰，45°和 225°两个典型斜风向角下的体型系数如图 7(c)、(d)所示。由

图 7(c)可见,45°斜风向下受角部锥形涡的影响,在 A 区迎风角区形成较大负压区,最小净风吸力体型系数为−1.0以下,向尾流方向迅速衰减,在尾流区 D 区的右侧出现较大的正风压区(图 7(c)中红圈),这是由于该区域的北侧紧邻一个高度超出光伏阵列高度的设备间,导致部分气流在该处被阻挡后下压形成正压。由图 7(d)所示,225°斜风向角下迎风 D 区的角部未出现较大的负压区,在 D 区左侧产生了较大的正压(图 7(d)中红圈),风压体型系数最大可达 0.8 以上,这是由于屋面的迎风端角区存在一个较高的设备间,阻挡了来流对角区组件的直接作用,其正压的产生可能是由于气流翻越设备间顶部后再覆而形成。综上可见,当屋面存在附属结构后,其对光伏阵列的气动力荷载将产生较大的影响,使原本的风吸力区变成风压力。

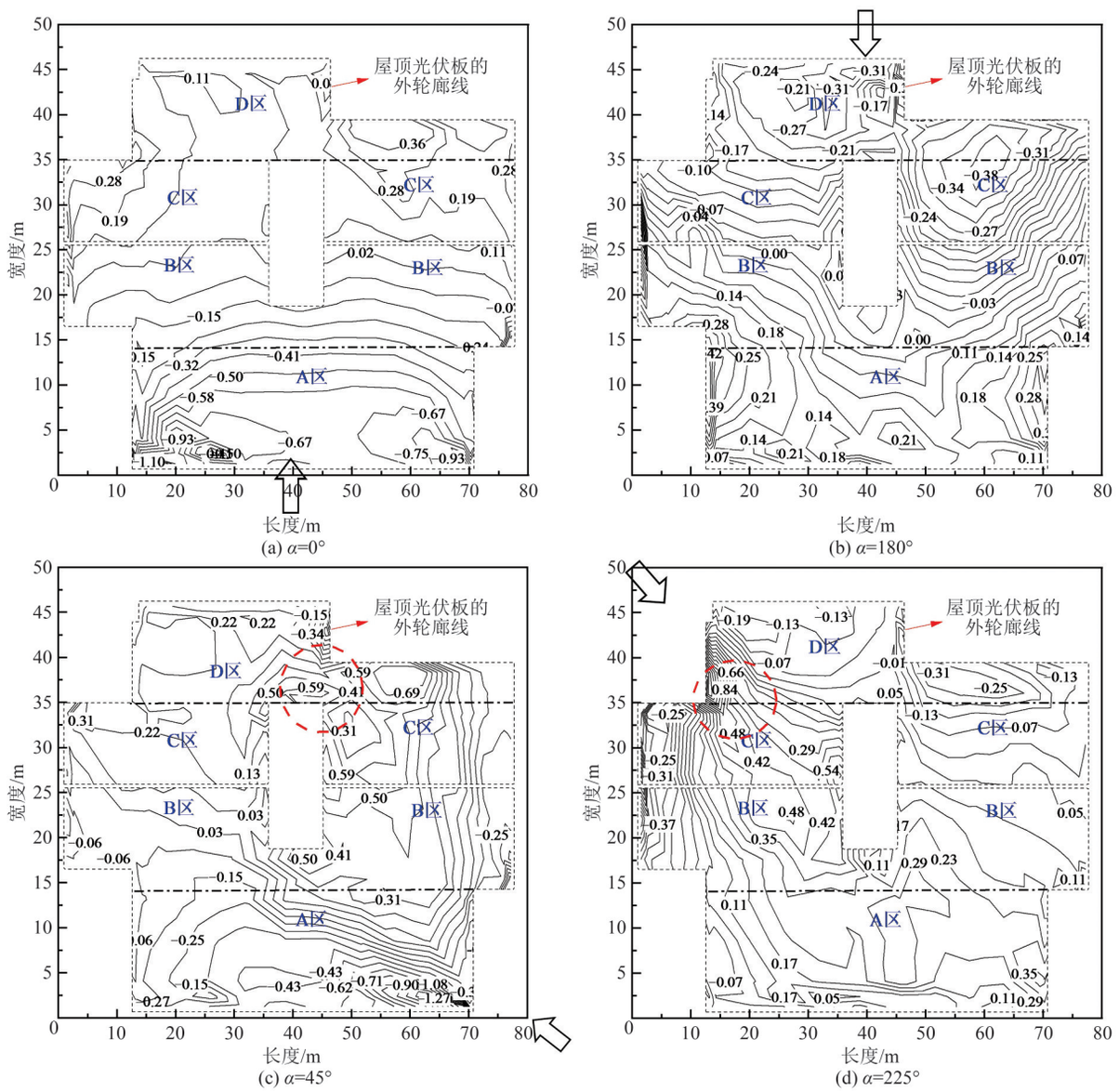


图 7 典型风向角下各测点的体型系数(h=1.55 m)

Fig.7 Shape coefficient of each measuring point under typical wind direction angles(h=1.55 m)

2.2 女儿墙高度对高支架光伏阵列风压分布的影响

本文试验原型建筑女儿墙高度 h=1.55 m,将女儿墙高度增加到最大高度 2.60 m、与光伏组件高度相近,研究其对平屋面高支架光伏阵列所受风荷载的影响。图 8 为女儿墙高度变化前后 4 个典型风向角 0°、45°、180°、225°下各个测点体型系数的变化情况。

由图 8(a)可见,风向角 α=0°时,随着女儿墙的增高,迎风端部 A 区测点负风压(吸力)体型系数整体下降,最大降幅(绝对值)可达 64.5%,女儿墙高度

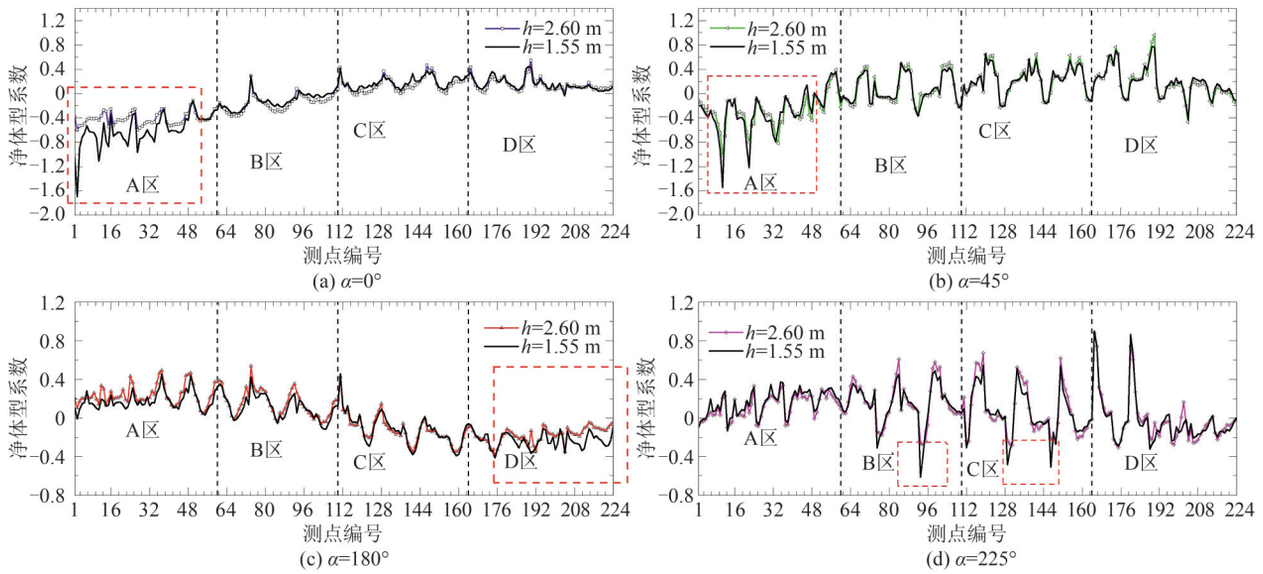


图 8　典型风向角下各测点的体型系数

Fig.8　Shape coefficient of each measuring point under typical wind direction angles

的增加使得光伏板上表所受风吸力减小，屋面其他区域的光伏阵列风压变化并不显著。由图 8(c)可见，风向角 $\alpha=180^\circ$时，体型系数随着女儿墙高度增加的变化趋势与 $\alpha=0^\circ$一致，即迎风端部区的负压力降低最为明显。由图 8(b)可见，斜风角 $\alpha=45^\circ$时，A 区光伏板角部区域所受的最大风吸力随着女儿墙高度增加明显下降，最大降幅可达 34.4%。由图 8(d)可见，风向角 $\alpha=225^\circ$时，迎风端 D 区随着女儿墙增加变化并不显著，在 B 区和 C 区的左边角部位置处出现了明显的吸力下降。总的来看，女儿墙高度的增加对于屋面风吸力有明显的优化效果，尤其是靠近檐口女儿墙位置区域的光伏阵列的风吸力降低效果最为明显。

2.3　全风向角下最不利极值风荷载

图 9、10 分别为屋顶分布式高支架光伏在 0°～345°全风向角下的最不利负、正体型系数的分布情况。

由图 9 可见，屋面的最大负吸力主要出现在南侧 A 区的两个角部区(图 9 中红圈)，体型系数最小值在－1.0 以下，靠近屋顶中线的中间区吸力整体不大，北侧 D 区光伏组件离檐口女儿墙仍有一段距离，部分受到前侧附属结构的遮挡，因此该区域的最不利风吸力比南侧明显减弱，最不利值多数在－0.5 以内。综上可见，在实际工程中应特别注意屋面角区处光伏组件与支架间的连接可靠性，避免在强风下由于过大风吸力而发生光伏组件损毁。各测点全风向角下的最大正体型系数分布如图 10 所示。由图 10 可见，最大正风压出现在 D 区的左右两侧靠近设备间的位置处，对应的最大体型系数为 0.7 左右。

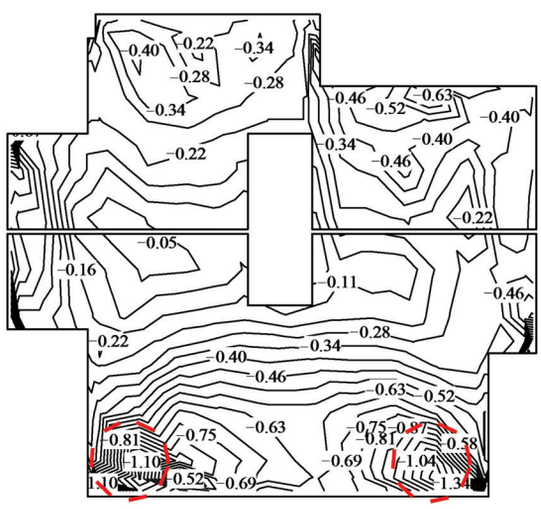


图 9　各测点全风向角下的最小负体型系数分布

Fig.9　Distribution of the minimum negative shape coefficient at all wind directions for each measuring point

我国规范 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》[15]和 NB/T 10115—2018《光伏支架结构设计规程》[16]中，光伏板整体体型系数仅考虑了光伏阵列迎风和背风两种风向情况，且主要针对地面电站、不考虑屋盖的影响，迎风时光伏板整体正风压体型系数为 0.8，背风向时整体负风压体型系数为－0.95。将规范的风载体型系数与本文结果进行对比发现，规范中的负体型系数要小于屋面角区的最不利负体型系数，说明按照规范取值将会使屋面角区光伏结构存在风灾安全隐患，而正风压体型系数

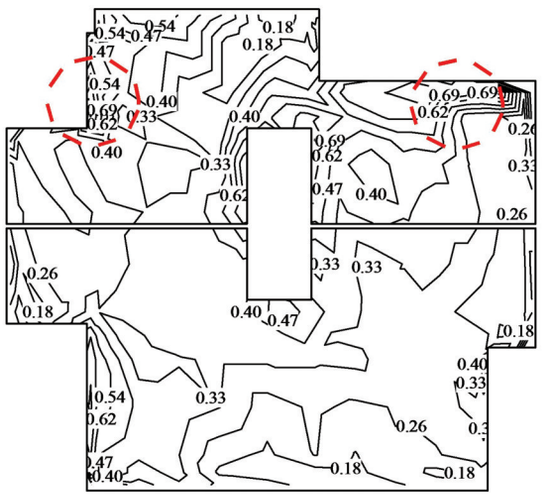


图 10 各测点全风向角下的最大正体型系数分布

Fig.10 Distribution of the maximum shape coefficient at all wind directions for each measuring point

绝大部分均小于规范建议值0.8。屋面本身及其附属设施的存在会使流经屋顶的气流产生更为复杂的涡脱和分离等气动现象,因此光伏阵列所受风效应与现行规范基于地面电站的结果存在显著差异,有必要对屋面分布式光伏系统的抗风设计相关标准进行针对性研究。

图 11 为对应图 9、10 中较不利正风压(如 $\mu>0.6$)和负风压($\mu<-0.8$)测点的风向角。由图 11 可见,考虑全风向角后的较不利风吸力(负风压)主要出现在风向角 0°～45°以及 330°～345°,考虑全风向角后的较不利风压力分布较为均匀,且斜风向下出现不利风荷载的测点比例更高,由此可见,屋面高支架光伏电站设计中应重视斜风效应。

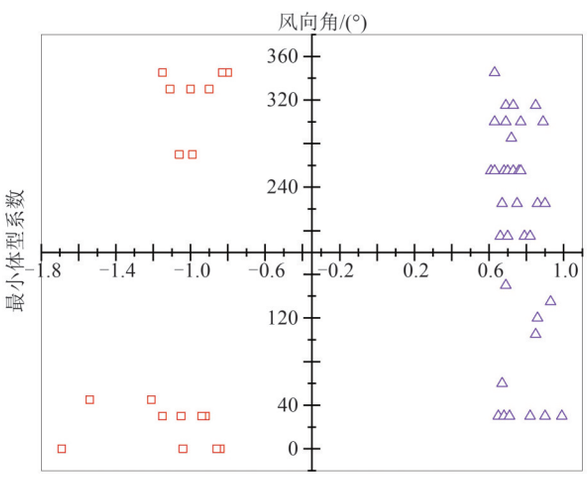


图 11 测点不利极值对应的风向角

Fig.11 Wind direction angles corresponding to the unfavorable extreme values at each measuring point

3 结论

本文对某平屋面上的高支架光伏阵列开展了风洞测压试验,考察了存在屋面附属结构高支架光伏板的风荷载分布特征,比较了其与传统理想屋面矮支架电站的受风特性差异,探索了女儿墙高度变化对屋面高支架光伏阵列风效应的影响,并与现有规范取值进行了对比。主要结论如下:

1)相比理想平屋面上的低矮支架阵列,屋面高支架光伏阵列在近檐口迎风区的负风吸力将会大幅增加,导致其破坏风险也大幅增加。屋面附属结构的干扰将会导致光伏阵列局部区域的负风压消失,产生较大的正风压力。近檐口区(如 A 区)比远离檐口区(如 D 区)的光伏阵列所受到的风吸力更不利。

2)女儿墙高度增加对屋面光伏阵列整体风压有降低效果,尤其是对靠近檐口处的光伏阵列的最大风吸力优化效果最为明显。

3)考虑全风向的光伏阵列最不利吸力出现在靠近檐口的 2 个角部区,斜风向下更易出现较大的风吸力。最不利的正风压出现在 D 区靠近设备间的两端,其对应的不利风向角同样集中在斜风向。

4)采用现行规范进行设计可能会低估屋面高支架光伏电站的不利风吸力,其主要原因在于现行规范的风荷载取值是基于地面光伏电站的结果,无法反映屋面及其干扰结构所产生的复杂气动现象。未来完善和发展针对屋面分布式光伏电站的抗风设计标准具有重要意义。

参考文献:

[1] 李明东, 李婧雯. “双碳”目标下中国分布式光伏发电的发展现状和展望[J]. 太阳能, 2023(5): 5-10.
LI Mingdong, LI Jingwen. Development status and prospects of distributed PV power generation in China under the goal of emission peak and carbon neutrality [J]. Solar Energy, 2023(5): 5-10.

[2] BRONKHORST A, FRANKE J, GEURTS C, et al. Wind tunnel and CFD modelling of wind pressures on solar energy systems on flat roofs[C]// The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010). Hill Chapel, CarolinaNorth, USA, 2010: 23-27 .

[3] 王京学, 杨庆山, 刘敏, 等. 平屋盖及双坡屋盖光伏系统风荷载特性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 21-28.
WANG Jingxue, YANG Qingshan, LIU Min, et al.

Experimental research on characteristics of wind loads of solar arrays mounted on flat and gable roofs[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 21-28.

[4] 王京学, 杨庆山, 田村幸雄. 平屋盖上光伏板风荷载特性研究[C]//第十六届空间结构学术会议论文集. 中国建筑科学研究院、中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会, 2016: 303-307.
WANG Jingxue, YANG Qingshan, TIAN Cunxing. Research on wind load characteristics of photovoltaic panels on flat roofs[C]// Proceedings of the 16th Symposium on Space Structures. Spatial Structure Committee of China Academy of Building Research and China Society of Civil Engineering, Bridge and Structural Engineering Branch, 2016 : 303-307.

[5] 余香林, 董锐, 王守强. 典型屋顶太阳能光伏板风压实测研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 542-549.
YU Xianglin, DONG Rui, WANG Shouqiang. Full-scale measurement and investigation of wind pressure loadings on typical rooftop photovoltaic solar panels[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016, 44(4): 542-549.

[6] 李嘉阳, 童乐为, 吴建明, 等. 建筑屋面光伏阵列风场的模拟[J]. 工业建筑, 2018, 48(8): 155-162.
LI Jiayang, TONG Lewei, WU Jianming, et al. Simulation of wind field of building roof photovoltaic array [J]. Industrial Building, 2018, 48 (8): 155-162.

[7] KOPP G A. Wind loads on low-profile, tilted, solar arrays placed on large, flat, low-rise building roofs[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(2): 04013057.

[8] KOPP G A, FARQUHAR S, MORRISON M J. Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 111: 40-52.

[9] PRATT R N, KOPP G A. Velocity measurements around low-profile, tilted, solar arrays mounted on large flat-roofs, for wall normal wind directions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 226-238.

[10] YAO J F, TU Z B, WANG D, et al. Experimental investigation of wind loads on roof-mounted solar arrays [J]. Sustainability, 2022, 14(14): 1-20.

[11] BROWNE M T L, GIBBONS M P M, GAMBLE S, et al. Wind loading on tilted roof-top solar arrays: The parapet effect[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 202-213.

[12] 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.

[13] WANG J X, YANG Q S, TAMURA Y. Effects of building parameters on wind loads on flat-roof-mounted solar arrays[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 174: 210-224.

[14] 王彩玉, 马文勇, 韩晓乐, 等. 女儿墙对平屋面阵列光伏板风荷载的影响[J]. 工程力学, 2021, 38(S1): 216-222.
WANG Caiyu, MA Wenyong, HAN Xiaole, et al. Effect of parapet on wind load of flat roof array solar pannel[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(S1): 216-222.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50009-2012 Building Constructions-Specifications for Loads of Architectural Structures[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.

[16] 中华人民共和国能源局. NB/T 10115—2018 光伏支架结构设计规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. NB/T 10115-2018 Code for Design of Photovoltaic Modules Support Structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

(编辑:赵漫红)