

长宽比对建筑屋顶光伏屋面风荷载特性的影响

谈 伶, 李永贵*, 陈文刚, 胡亚军

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年2月17日; 录用日期: 2026年3月10日; 发布日期: 2026年3月18日

摘 要

太阳能光伏板在如今的应用越来越广泛, 而板类结构为风敏感结构, 因此应对其抗风性能进行研究。本文采用刚性模型风洞测压试验, 研究了三种长宽比(1:1, 1.5:1, 2:1)的屋顶架空式光伏屋面在 0° ~ 90° 风向角下的平均、脉动及极值风压系数的分布特征。结果表明: 长宽比对屋顶架空光伏屋面的风压分布特性具有较大影响。随着长宽比的增大, 光伏屋面平均、脉动和极值风压系数幅值整体呈增大趋势, 最大平均、脉动及极值净风压系数均集中在迎风前缘角部区域。最不利极值净风压系数随风向角变化呈现先增大后减小的规律, 并在 30° 风向角下达到最大值。对于较大风向角(75° 和 90°), 迎风边长度的变化导致不同长宽比模型的极值风压幅值差异减弱, 表明长宽比是影响光伏屋面风荷载的重要几何因素。

关键词

风洞试验, 光伏屋面, 风压系数, 极值风压

The Effect of Aspect Ratio on Wind Load Characteristics of Building Roof Photovoltaic

Ling Tan, Yonggui Li*, Wengang Chen, Yajun Hu

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: February 17, 2026; accepted: March 10, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

Solar photovoltaic panels are increasingly widely applied today. As panel structures are wind-sensitive, research into their wind resistance performance is essential. This study employs rigid-model wind tunnel pressure measurement tests to investigate the distribution characteristics of average, pulsating, and peak wind pressure coefficients for three aspect ratios (1:1, 1.5:1, 2:1) of rooftop elevated photovoltaic systems under wind directions ranging from 0° to 90° . Results indicate that the

*通讯作者。

文章引用: 谈伶, 李永贵, 陈文刚, 胡亚军. 长宽比对建筑屋顶光伏屋面风荷载特性的影响[J]. 土木工程, 2026, 15(3): 142-152. DOI: 10.12677/hjce.2026.153062

aspect ratio significantly influences wind pressure distribution characteristics on elevated rooftop PV systems. As the aspect ratio increases, the magnitude of average, pulsating, and peak wind pressure coefficients generally rises, with maximum average, pulsating, and peak net wind pressure coefficients concentrated in the leading edge corner region. The most unfavorable peak net wind pressure coefficient exhibits a pattern of first increasing and then decreasing with wind direction angle, reaching its maximum at a 30° wind direction angle. For larger wind direction angles (75° and 90°), variations in the length of the windward side cause the differences in peak wind pressure amplitude among models with different aspect ratios to diminish, indicating that the aspect ratio is a crucial geometric factor influencing wind loads on photovoltaic roofs.

Keywords

Wind Tunnel Testing, Rooftop Photovoltaic Systems, Wind Pressure Coefficient, Peak Wind Pressure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着光伏发电技术的快速发展,屋顶光伏系统在城镇建筑中的应用日益广泛。相较于与屋面紧贴布置的光伏组件,屋顶架空式光伏屋面具有受风面积大、流场复杂等特点,其风荷载问题已成为结构设计中的关键控制因素。目前已有部分学者对不同地形条件下的光伏阵列进行了研究[1]-[4],结果表明,山坡坡度对山地光伏阵列的风荷载影响显著,坡面引起气流堵塞会降低光伏阵列中前排光伏组件对后排光伏组件的遮挡效应。对于安装在地面及屋顶上的光伏阵列,Xu等[5]研究了行距和离地间隙对光伏阵列风荷载的影响,结果表明,增大行距减小了前排对后排的遮挡效应。望世雄等[6]通过数值模拟研究了双坡光伏阵列的群体遮挡效应,结果表明,0°和15°为双坡光伏板体型系数的最不利风向,最大风吸力出现在背风光伏板前缘或角部位置。全勇等[7]研究了风向角和倾角对单竖排光伏阵列的风荷载特性的影响,结果表明,光伏组件阻力系数、升力系数以及扭矩系数均随倾角的增大而增大。Yao等[8]通过风洞试验对双坡屋面上的光伏阵列进行了研究,结果表明,靠近屋檐上表面有较大的风吸力。Peng等[9][10]研究了面板和建筑参数对附着在高层建筑上的光伏阵列风荷载的影响,结果表明,风向角越大流动扰动越明显。张学森等[11]通过风洞试验研究了不同女儿墙情况下的屋顶光伏板风荷载特性,结果表明,女儿墙对最不利风向角下光伏阵列的极值风吸力起到抑制作用。而对于四面开敞的棚式结构,Pratap等[12]通过风洞试验和计算流体力学(CFD)模拟研究了不同风向角下不同坡度的单坡屋面的风压分布,结果表明,屋面主要承受风吸力,在斜风向角下则承受更高的风吸力。Jiang等[13]通过风洞试验研究了不同底部建筑高度变化对屋顶雨棚风压的影响,结果表明,随着建筑高度的增加,上、下表面风压之间的相关性逐渐减小。

已有的研究多针对光伏阵列的风荷载,对架空式光伏屋面的研究较少,而长宽比的变化可能影响建筑周围流场从而影响光伏屋面风荷载。本文基于刚性模型同步测压风洞试验,对三种长宽比下的架空光伏屋面进行了研究,深入分析其平均、脉动和极值风荷载特性。

2. 风洞试验

试验于湖南科技大学风工程试验研究中心吸入式直流风洞中进行,试验段截面高3 m,宽4 m,长21 m,试验风速可调范围为0~30 m/s。

2.1. 试验模型及工况

试验模型缩尺比为 1:40, 在风洞中的布置情况如图 1 所示。试验模型下部建筑尺寸长(B)分别为 300 mm、450 mm、600 mm, 宽(d)为 300 mm, 高(h)为 270 mm, 对应不同建筑长宽比(1:1, 1.5:1, 2:1), 如图 2 所示, 最大模型阻塞比为 1.57%, 满足规范小于 5%的要求。架空光伏屋面水平平铺, 尺寸长(b)分别为 320 mm、470 mm、620 mm, 宽(d)为 320 mm, 距离底部建筑屋顶高度(h)为 75 mm, 与底部建筑高度比为 1:3.6。测点布置如图 3 所示, 上下对称布置。



Figure 1. Wind tunnel testing
图 1. 风洞试验图

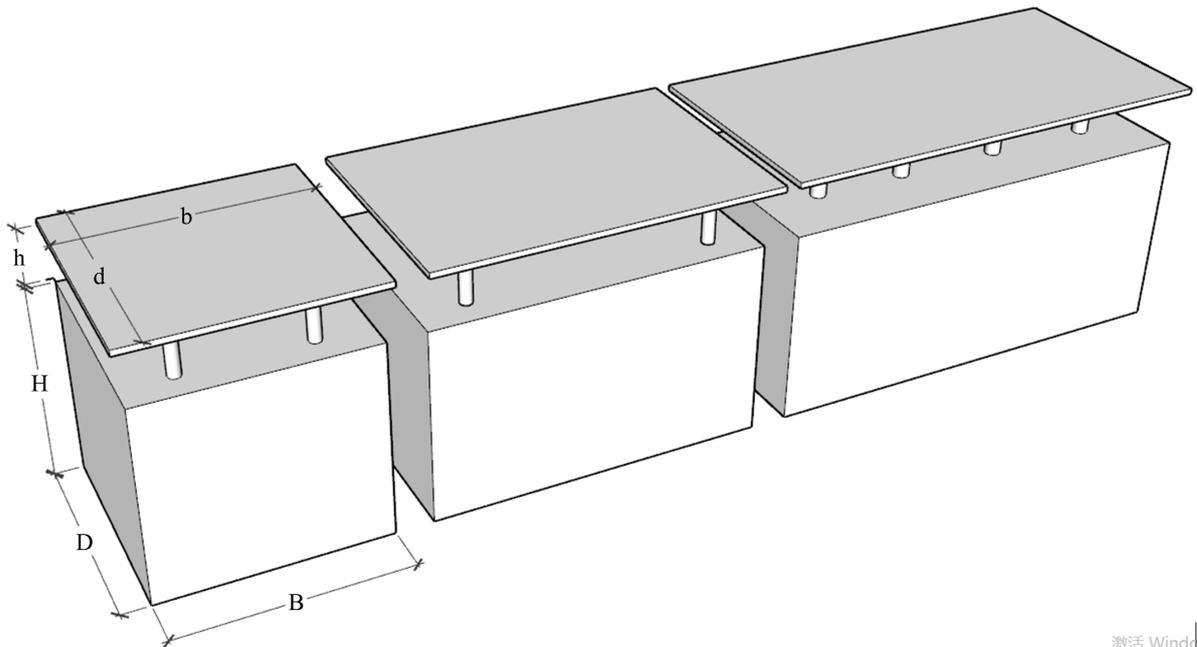


Figure 2. Layout of test model
图 2. 试验模型布置

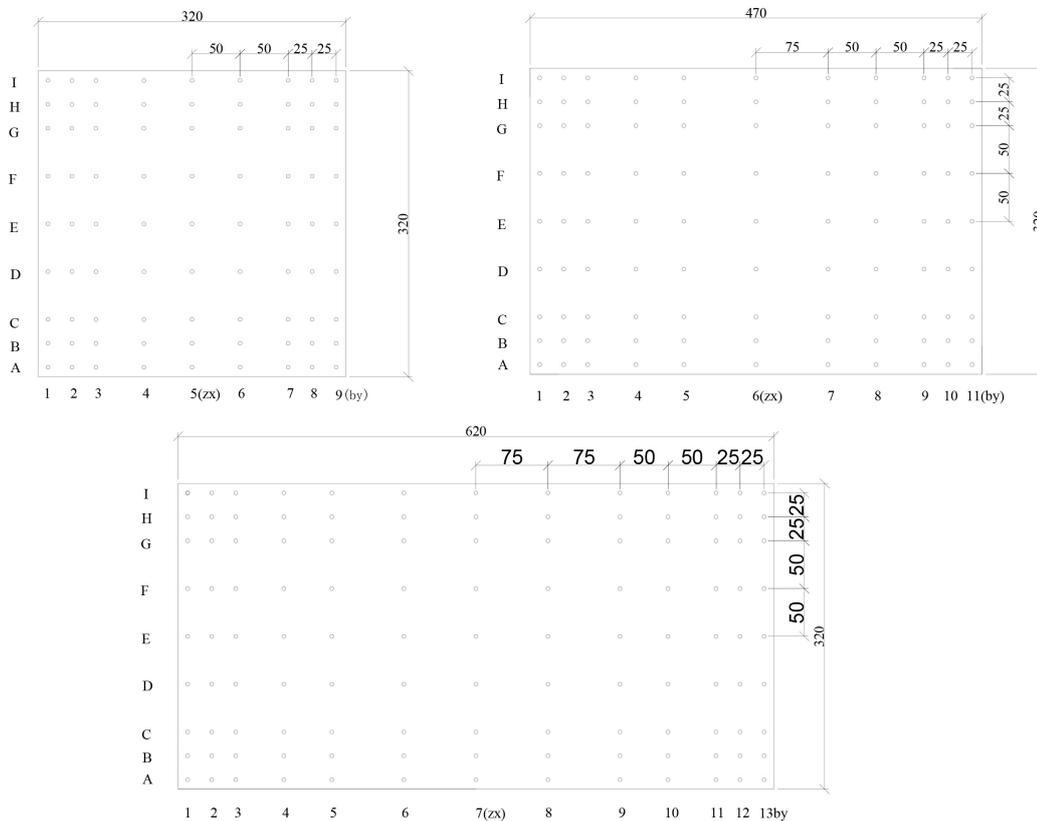


Figure 3. Layout of measuring points
图 3. 测点布置

2.2. 风场模拟

采用尖劈和粗糙元等被动装置模拟《建筑结构荷载规范》[14]中的 B 类风场，地貌粗糙度取 0.15，风场模拟结果如图 4 所示，以光伏屋面中心高度处 345 mm 为参考高度，参考风速为 8.23 m/s，试验风向角范围为 0°~90°，间隔 15°。

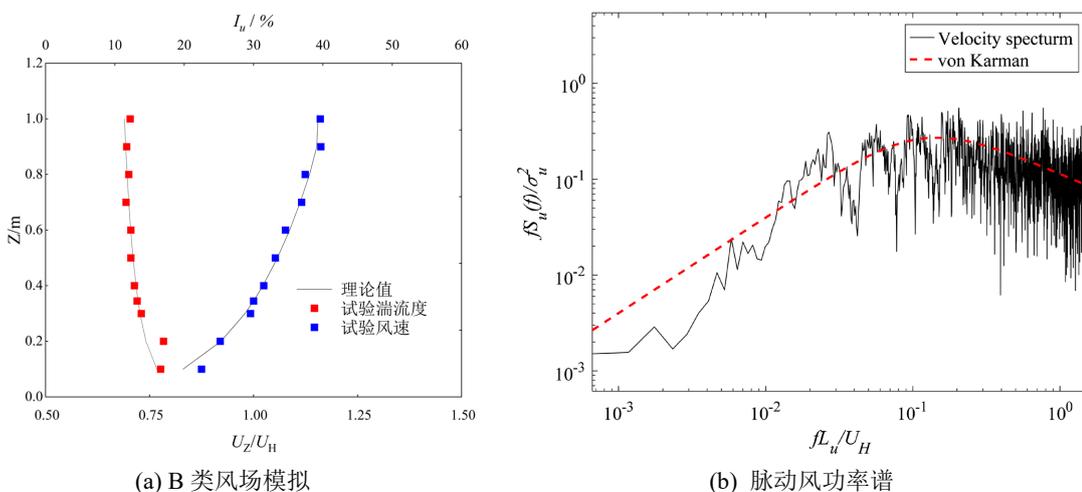


Figure 4. Characteristics of wind flow
图 4. 风场模拟结果

2.3. 数据处理

光伏屋面上下表面测点的风压系数按式(1), 式(2)计算:

$$C_{\text{pui}}(t) = \frac{P_{\text{ui}}(t) - P_{\infty}}{0.5\rho U_{\text{H}}^2} \quad (1)$$

$$C_{\text{pdi}}(t) = \frac{P_{\text{di}}(t) - P_{\infty}}{0.5\rho U_{\text{H}}^2} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{ui}}(t)$ 、 $P_{\text{di}}(t)$ 分别为光伏屋面测点 i 上、下表面的压力值时程, P_{∞} 为参考静压, U_{H} 为参考高度处的平均风速。

光伏屋面的净风压系数时程可由下式计算得到:

$$C_{\text{pi}}(t) = C_{\text{pui}}(t) - C_{\text{pdi}}(t) \quad (3)$$

由此可得, 测点 i 的平均净风压系数表达式为:

$$\bar{C}_{\text{pi}} = \frac{1}{N} \sum_{t_1}^{t_N} C_{\text{pi}}(t) \quad (4)$$

式中: N 为一个风压时程获得的样本数据量, 本试验中 $N = 15,000$ 。

光伏屋面面积平均风压系数表达式为:

$$C_{\text{ps}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{pi}}(t) \cdot A_i}{A} \quad (5)$$

由于光伏屋面对风吸力更加敏感, 因此本文主要针对极小值进行分析。极值风压系数采用 Cook-Mayne 法[15]估算。

3. 试验结果

由于 90° 风向角下变化规律与 0° 风向角下类似, 因此本节将对光伏屋面上 0° 与 45° 典型风向角下的表面压力分布特征进行分析。不同长宽比下边缘与中心线测点编号不同, 因此边缘线区域统一编号 by, 中心线区域统一编号 zx。

3.1. 平均风压系数

图 5 展示了 0° 风向角下不同长宽比的光伏屋面上、下表面沿边缘线测点和中心线测点的平均风压系数分布。从图 5(a)可以看出, 所有模型上表面均承受风吸力作用, 最大平均风压系数均由于光伏屋面前缘的气流分离出现在迎风前缘角部测点, 下游区域出现间歇性再附导致沿风向风吸力逐渐减小并趋于平稳, 此外还可以观察到长宽比为 1:1 的模型与长宽比为 1.5:1 的模型数值更为接近, 而长宽比为 2:1 的模型平均风压系数最大。从图 5(b)可以看出, 各模型平均风压系数差异相较于上表面更小, 说明长宽比的变化对下表面的影响较小, 下表面迎风前缘分离泡发展一段距离后达到最大半径, 因此边缘和中心线区域各模型的平均风压系数均在距离前缘一段距离后达到最大值, 此时边缘线区域长宽比为 2:1 的模型平均风压系数最大。

图 6 展示了 0° 风向角下不同长宽比光伏屋面平均净风压系数分布图。从图中可以看出, 三个模型在 0° 风向角下的风压分布均沿中心线对称分布, 在下部建筑屋顶前缘气流分离的影响下, 最大风吸力均出现在迎风前缘, 并呈向下游减小的分布规律, 此外三个模型均在光伏屋面中下游出现正压区域。随着长

宽比的增大,该正压区域面积逐渐减小,最大平均净风压系数逐渐增大,此时长宽比为 1:1 的模型的最大平均净风压系数为-1.44,长宽比为 1.5:1 的模型的最大平均净风压系数为-1.50,长宽比为 2:1 的模型的最大平均净风压系数为-1.66。

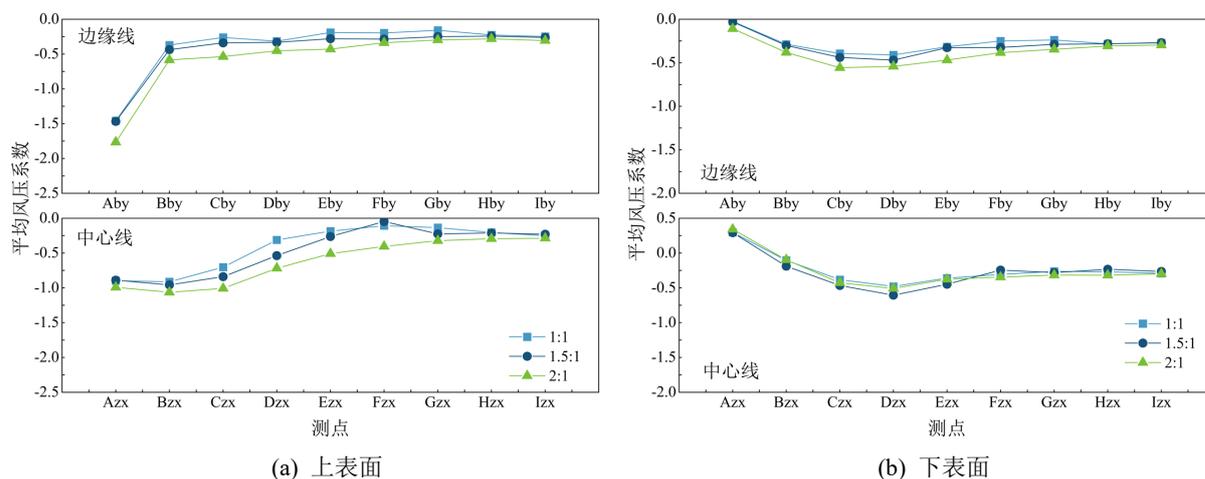


Figure 5. Distribution of mean wind pressure coefficients at 0° wind angle
图 5. 0°风向角下平均风压系数分布

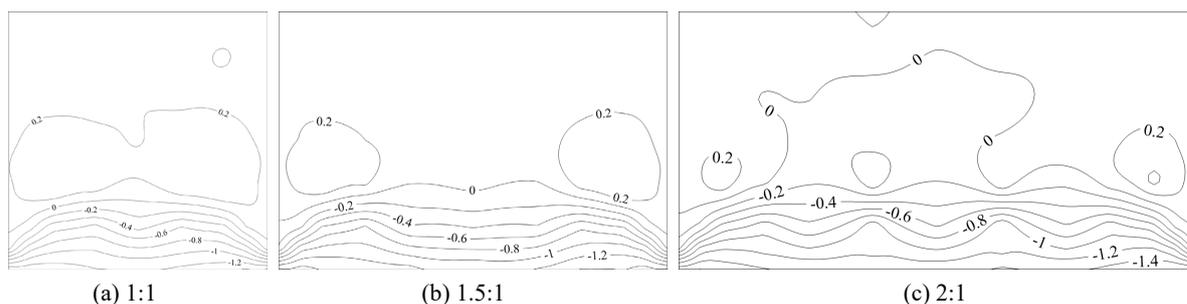


Figure 6. Distribution of mean net wind pressure coefficients at 0° wind angle
图 6. 0°风向角下平均净风压系数分布

图 7 展示了 45°风向角下不同长宽比的光伏屋面上、下表面沿边缘线测点和中心线测点的平均风压系数分布。从图 7(a)可以看出,所有模型在边缘线区域的平均风压系数均随着与迎风前缘距离的增大而呈现先增大后减小的趋势,由于锥形涡的存在,所有模型的最大平均风压系数出现在边缘区域的迎风上游,最大平均风压系数随着长宽比的增加而增大,而中心线区域平均风压系数各测点幅值相较于边缘线区域更小,在该区域长宽比为 2:1 的模型的平均风压系数略大于另外两个模型。从图 7(b)可以看出,在边缘区域各模型下表面以承受风压力为主,沿风向逐渐减小,不同长宽比的变化对下表面的影响相较于上表面减弱,在中心线区域,各模型风压均从正压逐渐过渡为负压,长宽比为 2:1 的模型的平均风压系数更大。

图 8 展示了 45°风向角下不同长宽比光伏屋面平均净风压系数分布图。从图中可以看出,三个模型平均净风压系数的整体分布特征类似,下部建筑与光伏屋面边缘的斜向剪切作用产生的锥形涡使得光伏屋面边缘区域的净风压以风吸力为主,平均净风压系数最大值出现在迎风前缘角部并沿风向逐渐减小,在光伏屋面尾部区域平均净风压系数趋近于 0。最大平均风压系数随着长宽比的增大而逐渐增大,此时长宽比为 1:1 的模型的最大平均净风压系数为-1.68,长宽比为 1.5:1 的模型的最大平均净风压系数为-2.10,长宽比为 2:1 的模型的最大平均净风压系数为-2.19。

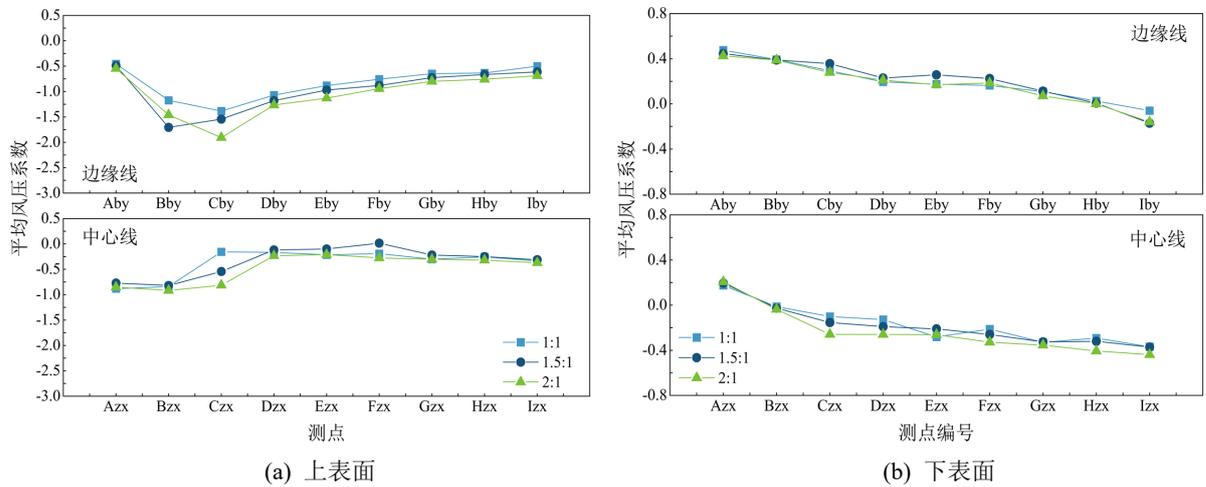


Figure 7. Distribution of mean wind pressure coefficients at 45° wind angle
图 7. 45°风向角下平均风压系数分布

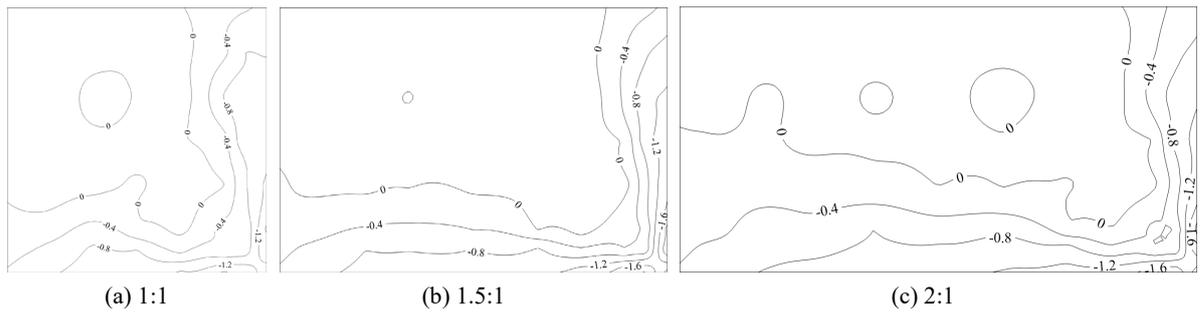


Figure 8. Distribution of mean net wind pressure coefficients at 45° wind angle
图 8. 45°风向角下平均净风压系数分布

图 9 展示了不同长宽比下光伏屋面的面积平均风压系数随风向角的变化规律。从图中可以看出，三个模型的变化规律相似，均随着风向角的增大而呈现先增大后减小的趋势，且均以风吸力为主，此时长宽比为 1:1 的模型的面平均风压系数在 $-0.06 \sim -0.23$ 范围内变化，长宽比为 1.5:1 的模型的面平均风压系数在 $0.02 \sim -0.24$ 范围内变化，长宽比为 2:1 的模型的面平均风压系数在 $0.02 \sim -0.26$ 范围内变化。在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 风向角范围内，光伏屋面的面积平均风压系数随着长宽比的增大而增大，而随着长宽比为 1.5:1 与长宽比为 2:1 的模型的迎风边由长边逐渐转变为短边，光伏屋面的面积平均风压系数逐渐转变为随着长宽比的增大而减小的趋势，并且长宽比为 1.5:1 的模型与长宽比为 2:1 的模型均在 90° 风向角下由风吸力转变为较小风压力。

3.2. 脉动风压系数

图 10 给出了 0° 风向角下不同长宽比光伏屋面脉动净风压系数分布图。可以看出，同 0° 风向角下的平均净风压系数分布形态类似，各模型的脉动净风压系数均沿中心线对称分布，最大值均出现在迎风前缘两侧，表明该区域气流发生强烈分离导致剪切层失稳并诱发剧烈的压力波动，随着气流向后流动并再附着，脉动净风压系数逐渐衰减。长宽比主要影响光伏屋面前缘两侧的脉动净风压系数幅值，此时长宽比为 1:1 的模型与长宽比为 1.5:1 的模型的最大脉动净风压系数数值较为接近，分别为 0.60 和 0.62，而长宽比为 2:1 的模型的最大脉动净风压系数为 0.67。

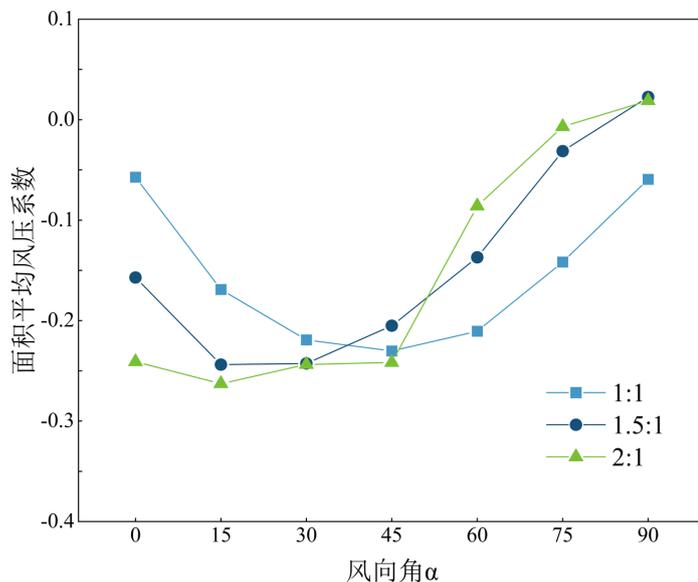


Figure 9. Variation of the mean wind pressure coefficient with wind direction angle
图 9. 面积平均风压系数随风向角的变化

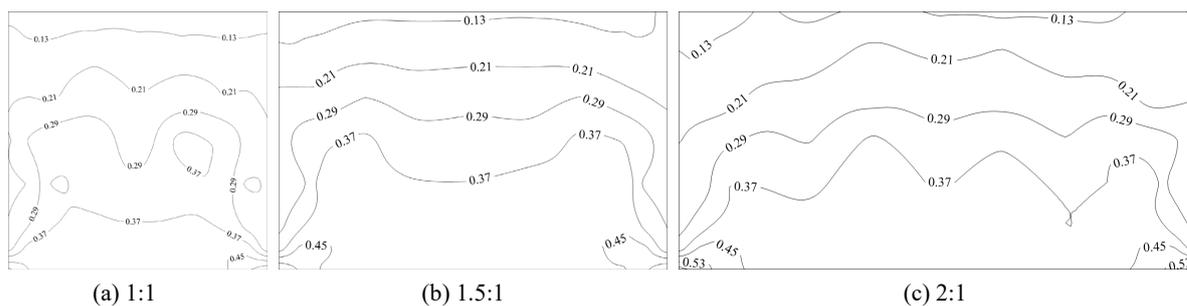


Figure 10. Distribution of fluctuating net wind pressure coefficients at 0° wind angle
图 10. 0° 风向角下脉动净风压系数分布

图 11 给出了 45° 风向角下不同长宽比光伏屋面脉动净风压系数分布图。可以看出，三个模型均受到锥形涡的影响导致最大脉动净风压系数均出现在迎风前缘两侧角部区域，并且最大脉动净风压系数随着长宽比的增大而逐渐增大，此时长宽比为 1:1 的模型的最大脉动净风压系数为 0.76，长宽比为 1.5:1 的模型的最大脉动净风压系数为 0.97，长宽比为 2:1 的模型的最大脉动净风压系数为 0.98。与平均风压系数的规律类似， 45° 风向角下，随着长宽比的增大，其对光伏屋面最大脉动净风压系数的影响逐渐削弱。

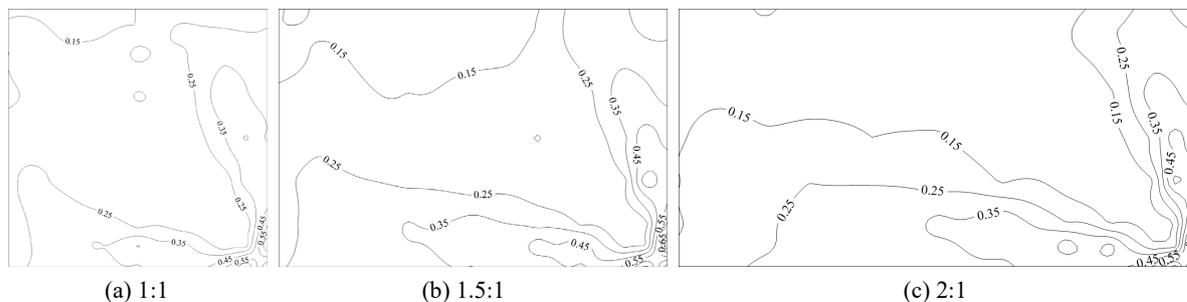


Figure 11. Distribution of fluctuating net wind pressure coefficients at 45° wind angle
图 11. 45° 风向角下脉动净风压系数分布

3.3. 极小值风压系数

图 12 给出了 0° 风向角下不同长宽比光伏屋面极值净风压系数分布图。可以看出, 各模型的极值净风压系数整体分布类似, 均沿中心线对称分布, 风压系数幅值均出现在光伏屋面前缘气流分离区, 且前缘角部极值风压系数最大, 随着长宽比的增大, 光伏屋面最大极值净风压系数逐渐增大, 长宽比为 1:1 的模型的最大极值净风压系数为 -4.26 , 长宽比为 1.5:1 的模型的最大极值净风压系数为 -4.76 , 长宽比为 2:1 的模型的最大极值净风压系数为 -5.17 。

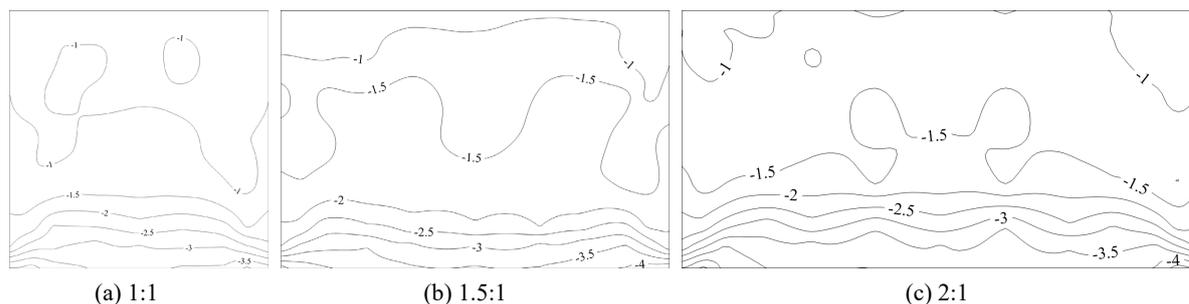


Figure 12. Distribution of peak net wind pressure coefficients at 0° wind angle

图 12. 0° 风向角下极值净风压系数分布

图 13 给出了 45° 风向角下不同长宽比光伏屋面极值净风压系数分布图。可以看出, 该风向角下各模型极值净风压系数均从迎风前缘沿对角线扩展, 最大极值净风压系数均出现在迎风前缘的两侧角部区域, 其值随着长宽比的增大而逐渐增大, 长宽比为 1:1 的模型的最大极值净风压系数为 -5.64 , 长宽比为 1.5:1 的模型的最大极值净风压系数为 -6.27 , 长宽比为 2:1 的模型的最大极值净风压系数为 -6.32 。在 45° 风向角下, 长宽比增大至一定程度后, 其对极值净风压系数幅值的影响逐渐削弱。

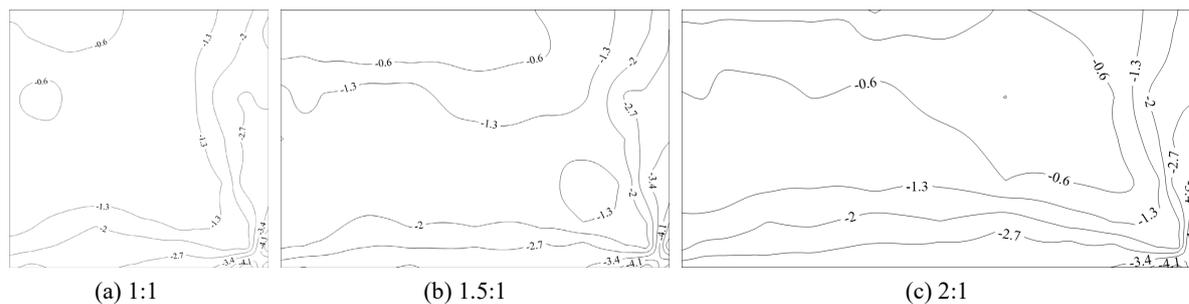


Figure 13. Distribution of peak net wind pressure coefficients at 45° wind angle

图 13. 45° 风向角下极值净风压系数分布

图 14 展示了不同长宽比光伏屋面最不利极值净风压系数随风向角的变化规律。可以看出, 随着风向角从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化, 最不利极值净风压系数呈现先增大后减小的趋势, 各模型均在 30° 风向角下达到最不利极值, 此时长宽比为 1:1 的模型的最不利极值净风压系数为 -5.89 , 长宽比为 1.5:1 的模型的最不利极值净风压系数为 -6.45 , 长宽比为 2:1 的模型的最不利极值净风压系数为 -6.95 。在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 风向角下, 长宽比对光伏屋面的影响较大, 最不利极值净风压系数随着长宽比的增大而逐渐增大, 而在 45° 风向角下长宽比为 1.5:1 的模型与长宽比为 2:1 的模型的数值接近, 在 75° 和 90° 风向角下, 由于长宽比为 1.5:1 的模型与长宽比 2:1 的模型的迎风边从长边过渡为短边, 导致在该风向角下的最不利极值净风压系数小于长宽比为 1:1 的模型。

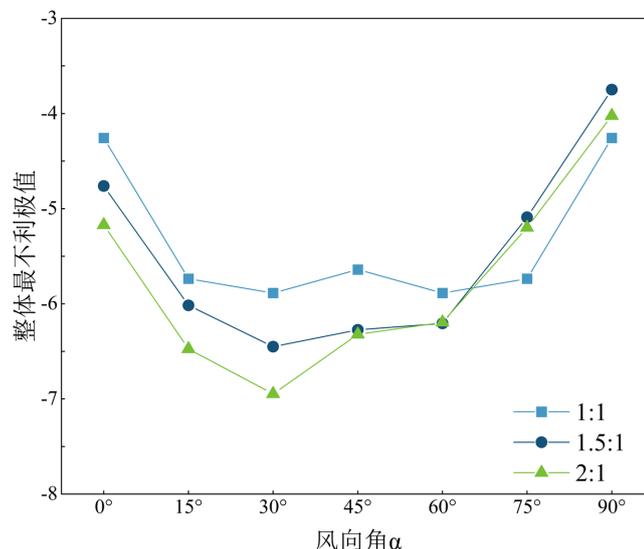


Figure 14. Most unfavorable peak net wind pressure coefficients
图 14. 最不利极值净风压系数随风向角的变化

4. 结论

1) 不同长宽比光伏屋面在 0° 与 45° 风向角下均表现出典型的前缘气流分离特征，最大平均风吸力集中于迎风前缘角部区域并沿风向逐渐减小。随着长宽比的增大，上表面及平均净风压系数幅值整体呈增大趋势，其中长宽比为 2:1 的模型平均风吸力最大，而长宽比为 1:1 与 1.5:1 模型差异较小。相比之下，下表面平均风压系数对长宽比变化不敏感，表明其主要受屋面间隙流场影响。

2) 0° 风向角下，由于剪切层失稳而压力波动导致脉动净风压系数最大值出现在迎风前缘两侧，并随着长宽比的增大而增大。而在 45° 风向角下，锥形涡的存在导致最大脉动净风压系数最大值出现在迎风角部两侧，同样随着长宽比的增大而增大，但长宽比为 1.5:1 与 2:1 模型的差异较小，表明在斜向来流条件下长宽比对脉动风压的影响逐渐减弱。

3) 极值净风压系数最大值均出现在光伏屋面迎风前缘角部区域，且随长宽比增大而逐渐增大。最不利极值净风压系数随着风向角的增大而呈现先增大后减小的趋势，均在 30° 风向角下达到最大值，此时长宽比为 2:1 模型对应的极值风压幅值最大。对于大风向角 ($75^\circ \sim 90^\circ$)，由于迎风边由长边转变为短边，长宽比为 1.5:1 与 2:1 模型的极值风压幅值反而小于 1:1 模型，表明迎风边尺度是影响光伏屋面极值风荷载的重要几何参数。

不同长宽比光伏屋面上下表面风压的相关性分析是明确净风压系数形成的内在机制，将作为未来研究方向进行探讨，此外将尝试给出不同长宽比的拟合关系或修正系数。

基金项目

国家自然科学基金(52578581)。

参考文献

- [1] Yao, J., Tu, Z. and Xu, H. (2025) Experimental Investigation of Wind Pressures on Photovoltaic (PV) Array Mounted on a Hilly Terrain. *Solar Energy*, **291**, Article 113256. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113256>
- [2] 徐亚洲, 田锐, 李冰, 等. 山地光伏阵列风荷载地形效应风洞试验研究[J]. 土木工程学报, 2026, 59(2): 35-46.
- [3] 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, 2026, 47(1): 1-10.

- 2025, 46(3): 404-411.
- [4] 钟旻, 周启港, 周占学, 等. 不同山坡地形下光伏阵列风荷载干扰效应研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(6): 104-112.
- [5] Xu, A., Ma, W., Yuan, H. and Lu, L. (2024) The Effects of Row Spacing and Ground Clearance on the Wind Load of Photovoltaic (PV) Arrays. *Renewable Energy*, **220**, Article 119627. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119627>
- [6] 望世雄, 王顺波, 邱治. 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, 842.
- [7] 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.
- [8] Yao, J.F., Tu, Z.B., Shen, G.H., Guo, Y. and Wang, D. (2024) Experimental Investigation of Wind Pressures on Photovoltaic (PV) Panel Installed Parallel to Residential Gable Roof. *Solar Energy*, **271**, Article 112452. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112452>
- [9] Peng, H.Y., Shen, Z., Liu, H.J. and Dai, S.F. (2024) Wind Loads on Rooftop Solar Photovoltaic Panels Oriented with Varying Azimuth Angles: A Comprehensive Wind Tunnel Analysis. *Journal of Building Engineering*, **92**, Article 109747. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109747>
- [10] Peng, H.Y., Dai, S.F. and Liu, H.J. (2023) Wind Loading Characteristics and Roof Zoning of Solar Arrays Mounted on Flat-Roofed Tall Buildings. *Journal of Building Engineering*, **66**, Article 105823. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105823>
- [11] 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.
- [12] Pratap, A. and Rani, N. (2023) Study of the Wind-Induced Effects on Various Roof Angles of a Mono-Slope Canopy Roof Using Wind Tunnel Testing and Computational Fluid Dynamics. *Sādhanā*, **48**, Article No. 167. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02199-9>
- [13] Jiang, Y., Hui, Y., Li, M., Zhu, H. and He, B. (2024) Experimental Study on Wind Load Characteristics of Rooftop Canopies of Low and Medium Rise Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **249**, Article 105748. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105748>
- [14] 金新阳, 王建, 王国砚, 等. GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [15] Cook, N.J. and Mayne, J.R. (1980) A Refined Working Approach to the Assessment of Wind Loads for Equivalent Static Design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **6**, 125-137. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(80\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0167-6105(80)90026-4)