

# 纵向间距对光伏阵列风荷载影响的数值模拟研究

邵梦凯<sup>1</sup> 周炬毅<sup>2,\*</sup>

(1. 陕西建工集团股份有限公司, 西安 710003; 2. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

**摘要** 采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法, 分析了纵向间距对光伏阵列的流场结构和光伏板表面风荷载的影响。通过数值模拟结果与风洞试验结果的对比, 验证了数值模拟方法的准确性。结果表明, 纵向间距对第一排光伏板尾流区的流场结构有着较为明显的影响, 这导致第二排光伏板的风荷载对纵向间距最为敏感。当纵向间距较小时, 第二排光伏板有可能会承受较大的扭矩。第三排至第八排光伏板的风荷载受纵向间距的影响相对较小, 总体上随纵向间距的减小而减小。

**关键词** 计算流体动力学(CFD), 光伏阵列, 纵向间距, 风荷载

中图分类号: TU312+1 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202505.0011

## Numerical Simulation Study on Effect of Longitudinal Spacing on Wind Load on Photovoltaic Array

SHAO Mengkai<sup>1</sup> ZHOU Xuanyi<sup>2,\*</sup>

(1. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an 710003, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** A computational fluid dynamics (CFD) method is employed to analyze the influence of longitudinal spacing on the flow field around a photovoltaic array and the resulting wind load on the panels. The validity of the numerical simulation is confirmed through comparison with wind tunnel test results. The findings indicate that longitudinal spacing significantly affects the wake flow field behind the first row, causing the wind load on the second row to be the most sensitive to changes in spacing. Moreover, it is observed that the second row can experience considerable torque when the longitudinal spacing is small. In contrast, the wind load on the third to the eighth rows is only marginally influenced by the longitudinal spacing and generally decreases as the spacing is reduced.

**Keywords** computational fluid dynamics (CFD), photovoltaic array, longitudinal spacing, wind load

## 0 引言

近年来,在“双碳”目标的背景下,太阳能光伏板得到了越来越多的推广和应用。光伏支架质量轻、跨度大的结构形式,决定了风荷载是支架设计

的主要控制荷载。光伏阵列的纵向间距会影响光伏阵列的风荷载,尽管《光伏电站设计标准》(GB 50797—2012)<sup>[1]</sup>给出了纵向间距的取值要求,但在实际工程中受地形条件、使用场景的限制,不同光伏阵列的纵向间距仍有着较大的差别。

收稿日期: 2024-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078380)

作者简介: 邵梦凯(1999-),男,硕士,主要从事结构风工程研究。E-mail: shao\_mk@163.com

\* 联系作者: 周炬毅(1975-),男,教授,博导,主要从事新能源产业的防灾减灾、结构的风雪荷载研究。E-mail: zhouxtyj@tongji.edu.cn

然而,我国相关规范<sup>[1-3]</sup>对光伏板的风荷载取值作出规定时,并未考虑纵向间距的影响。

目前,研究人员主要通过风洞试验和数值模拟研究光伏阵列的风荷载。邹云峰等<sup>[4]</sup>对单块光伏板进行了刚性模型测压风洞试验,得到光伏板在典型倾角和风向角下的表面风压分布。王峰等<sup>[5]</sup>对单块光伏板和光伏阵列进行了风洞试验,分析了光伏板风荷载的最不利风向角以及光伏板之间的干扰效应。马文勇等<sup>[6-9]</sup>通过风洞试验研究了风向角、光伏板倾角、底部阻塞率对光伏阵列风荷载的影响,提出了考虑风致弯矩影响的光伏板表面风荷载分布模型。不同于风洞试验,CFD方法具有周期短、流场可视化、便于进行机理研究等优点,在科研和工程中得到了广泛的应用。张炜等<sup>[10]</sup>通过CFD方法,研究了单块大倾角地面太阳能电池板的风压分布特性及风荷载体型系数。周炜等<sup>[11]</sup>和全勇等<sup>[12]</sup>进一步利用CFD方法研究了不同风向角和光伏板倾角下光伏阵列风荷载的分布特性。楼文娟等<sup>[13]</sup>和许宁等<sup>[14]</sup>利用CFD方法研究了光伏阵列的遮挡效应,并给出了光伏阵列各个分区的体型系数建议值。

虽已有部分文献<sup>[15-19]</sup>报道了不同安装间距对光伏阵列风荷载的影响,但大多侧重于安装间距对光伏板整体体型系数的影响,少有研究考虑光伏板表面风压分布不均匀引起的风致扭矩。同时,Zhang等<sup>[20-21]</sup>对平单轴跟踪式光伏支架进行了气弹模型试验,发现风荷载作用下风致扭矩会使光伏支架产生大幅扭转位移,这表明风致扭矩的取值对平单轴跟踪式光伏支架的设计至关重要。鉴于此,本文通过CFD数值模拟和风洞试验的方法,选取 $30^\circ$ 倾角的光伏板为研究对象,研究了纵向间距对光伏阵列的流场结构和光伏板表面风荷载的影响,为光伏支架结构的抗风设计提供参考依据。

## 1 数值模拟概况

### 1.1 研究对象

本文的研究对象如图1所示,光伏板倾角 $\beta=30^\circ$ ,长度 $L=100\text{m}$ ,弦长 $C=2.4\text{m}$ ,光伏板中心离地高度 $H=2.04\text{m}$ 。为了探讨纵向间距对光伏阵列风荷载的影响,考虑了纵向间距 $D$ (排中心距)分别取为 $16\text{m}$ 、 $12\text{m}$ 、 $8\text{m}$ 、 $6\text{m}$ 、 $4.8\text{m}$ 的情况。纵向

间距比定义为纵向间距 $D$ 与光伏板弦长 $C$ 的比值, $D/C$ 分别为 $6.7$ 、 $5.0$ 、 $3.3$ 、 $2.5$ 、 $2.0$ 。来流方向主要考虑了风向角 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=270^\circ$ 两种情况。各排光伏板的编号为R1—R8,编号不随风向角改变(第一排是指 $90^\circ$ 风向角下的R1和 $270^\circ$ 风向角下的R8,以此类推)。

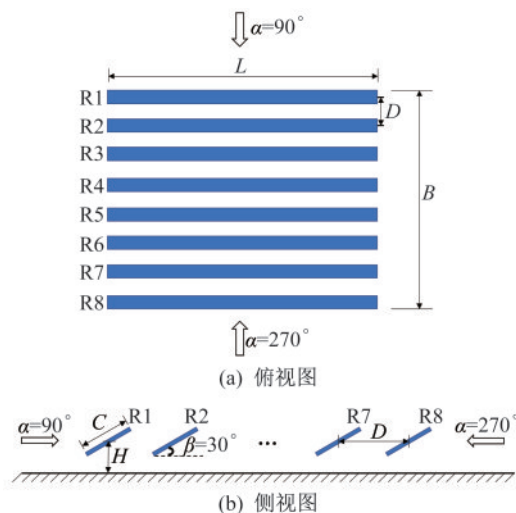


图1 光伏阵列示意图

Fig.1 Schematic diagram of photovoltaic array

### 1.2 计算域及网格划分

光伏阵列的整体尺寸较大,若进行足尺模拟计算量较大。Aly等<sup>[22]</sup>通过风洞试验与数值模拟研究了光伏板缩尺比在 $1:5$ 至 $1:50$ 范围内的风荷载特性,发现缩尺比对光伏板平均风荷载的影响较小。因此,本文按照 $1:40$ 的缩尺比在FLUENT软件中进行建模。如图2(a)所示,计算域尺寸为 $5L \times 9B \times 26H$ ( $x \cdot y \cdot z$ ),光伏阵列的外缘到计算域入口、出口的距离分别为 $2B$ 、 $6B$ ,到计算域侧面的距离均为 $2L$ 。

网格划分利用ICEM CFD软件进行。网格方案采用渐变的结构化网格,最小网格尺寸为 $2\text{mm}$ ,网格增长率为 $1.08$ ,网格总数约为 $500$ 万。图2(b)给出了纵向间距比 $D/C=2.5$ 的光伏阵列网格划分结果。

### 1.3 边界条件和计算参数设置

计算域入口设置为速度入口,采用YANG等<sup>[23]</sup>提出的平衡大气边界层条件,如式(1)一式(3)所示:

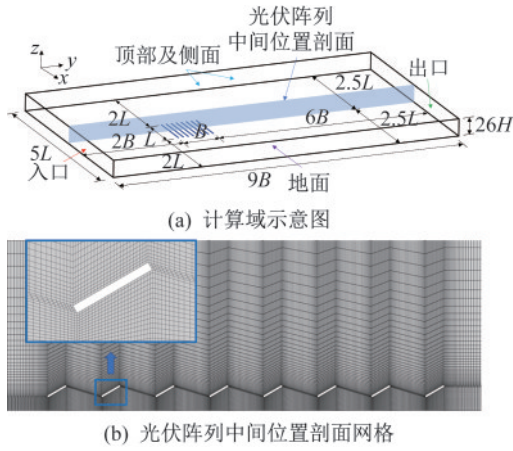


图2 计算域示意图和网格划分方案

Fig.2 Computational domain and computational grid

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0} + 1\right) \quad (1)$$

$$k(z) = \sqrt{C_1 \ln(z + z_0) + C_2} \quad (2)$$

$$\varepsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3)$$

式中： $U(z)$ 、 $k(z)$ 、 $\varepsilon(z)$ 为高度 $z$ 处的风速、湍动能和湍流耗散率； $\kappa$ 为卡门常数，取为0.42； $C_\mu$ 为湍流模型中的经验常数，取为0.09； $u_*$ 为摩擦速度， $z_0$ 为气动粗糙度，根据第2节中描述的风洞试验风速剖面拟合可得 $u_* = 0.29$  m/s， $z_0 = 1.5 \times 10^{-7}$  m，拟合结果如图5(a)所示； $C_1$ 、 $C_2$ 为拟合参数，通过拟合风洞试验的湍动能剖面 $k(z) = 1.2 [U(z)I(z)]^2$ 可得<sup>[24]</sup>， $C_1 = -0.45$ ， $C_2 = 8.76$ 。

计算域出口设置为自由出流边界，侧面及上边界设置为对称边界，地面及光伏板表面设置为无滑移壁面边界，采用Standard Wall Function进行近壁面处理。湍流模型采用Realizable  $k$ - $\varepsilon$ 模型，离散格式采用二阶迎风格式，压力速度耦合采用SIMPLEC算法。收敛标准为无量纲残差降至 $10^{-6}$ 以下，且收敛时光伏板表面监测点的风压随迭代步数的增加保持不变。

#### 1.4 参数定义

局部平均风压系数 $C_{pi}$ 的计算公式：

$$C_{pi} = \frac{p_i - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_H^2} \quad (4)$$

式中： $p_i$ 为网格单元 $i$ 中心处的风压； $p_0$ 为参考点静压； $\rho$ 为空气密度； $U_H$ 为参考点来流风速（ $U_H = 9.05$  m/s）。

分别采用 $C_{pu}$ 、 $C_{pl}$ 、 $C_{pnet}$ 表示光伏板上表面风压

系数、下表面风压系数和净风压系数：

$$C_{pu} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{pui} A_i}{LC} \quad (5)$$

$$C_{pl} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{pli} A_i}{LC} \quad (6)$$

$$C_{pnet} = C_{pu} - C_{pl} \quad (7)$$

式中： $C_{pui}$ 、 $C_{pli}$ 为光伏板上表面、下表面网格单元 $i$ 的局部风压系数； $A_i$ 为网格单元 $i$ 的面积； $N$ 为光伏板上表面或下表面的网格总数。

分别采用 $C_{mu}$ 、 $C_{ml}$ 、 $C_{mnet}$ 表示光伏板上表面扭矩系数、下表面扭矩系数和净扭矩系数：

$$C_{mu} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{pui} A_i y_i}{LC^2} \quad (8)$$

$$C_{ml} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{pli} A_i (-y_i)}{LC^2} \quad (9)$$

$$C_{mnet} = C_{mu} + C_{ml} \quad (10)$$

式中： $y_i$ 为网格单元 $i$ 的中心位置在沿弦长方向局部坐标系中的坐标值。

根据以上定义，各参数的正方向定义如图3所示。

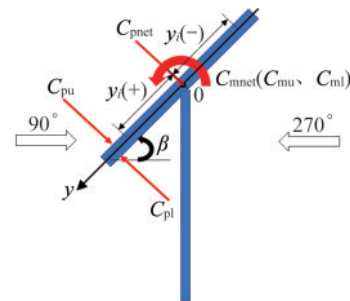
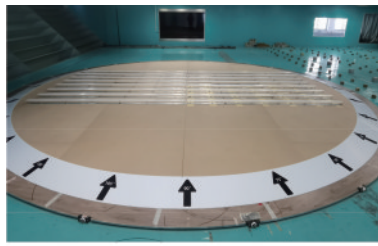


图3 参数方向定义示意图

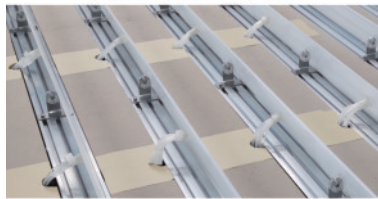
Fig.3 Definition of parameter direction

## 2 数值模拟结果的验证

本文在同济大学TJ-3风洞中进行了 $\beta = 30^\circ$ 、 $D/C = 5$ 光伏阵列刚性模型测压试验，如图4所示。光伏板的风洞试验模型与数值模拟几何模型相同，风洞试验模型沿光伏板长度方向的14个截面上布置测压孔，每个截面上、下表面各布置4个测压孔，每块光伏板共布置112个测点同步测压。风洞试验的风速剖面、湍流度剖面以及光伏板中心高度处的顺风向脉动风速谱如图5所示，光伏板中心高度处的来流风速为9.05 m/s，湍流强度为13.5%。



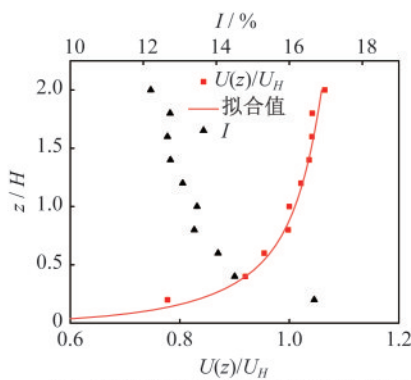
(a) 风洞试验整体布局



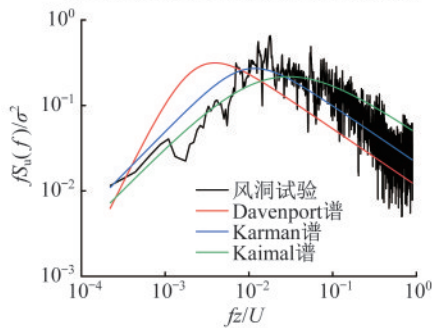
(b) 光伏板模型局部

图4 风洞试验照片

Fig.4 Photo of wind tunnel test



(a) 风洞试验风速剖面 and 湍流强度剖面



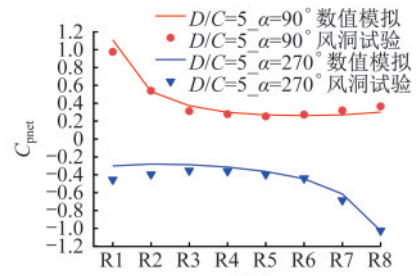
(b) 风洞试验光伏板中心高度处顺风向脉动风速谱

图5 风洞试验入流条件

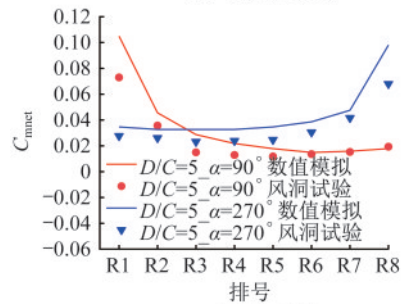
Fig.5 Inflow conditions of the wind tunnel test

图6给出了纵向间距比  $D/C=5$  时各排光伏板净风压系数、净扭矩系数的数值模拟结果和风洞试验结果。从图6(a)可以看出,  $\alpha=90^\circ$  时, 各排光伏板净风压系数的数值模拟结果和风洞试验结果吻合较好;  $\alpha=270^\circ$  时, R1—R3净风压系数绝对值的数值模拟结果略小于风洞试验结果。从图6(b)可以看出, 两种风向角下数值模拟得到的净扭矩系数随排号变化规律与风洞试验结果基本一

致, 净扭矩系数模拟结果偏大的原因可能是: 风洞试验计算净扭矩系数是采用光伏板上、下表面共112个测点的风压进行计算的, 而数值模拟是采用光伏板表面各个网格节点处的风压进行计算的。数值模拟计算扭矩系数时采用的数据点远远多于风洞试验测点, 导致光伏板净扭矩系数数值模拟结果与风洞试验结果存在差异。总体来说, 数值模拟结果与风洞试验结果比较一致。因此, 可以通过数值模拟进一步研究纵向间距对光伏阵列风荷载的影响。



(a) 净风压系数



(b) 净扭矩系数

图6 数值模拟结果与风洞试验结果对比

Fig.6 Comparison between numerical simulation results and wind tunnel test results

### 3 结果与讨论

#### 3.1 纵向间距对光伏阵列流场结构的影响

图7给出了不同工况下前两排光伏板周围流场的速度云图及流线图。从图7(a)中可以看出,  $90^\circ$  风向角下, 当  $D/C=6.7$  时, 在R1的背风面形成光伏板下缘分离的较大旋涡 Vortex1 和光伏板上缘分离的较小旋涡 Vortex2。当  $D/C=5.0$  时, R2对R1尾流的阻碍作用增强, 促使旋涡 Vortex1 和 Vortex2 的右侧形成新的旋涡 Vortex3。随着纵向间距的进一步减小, 旋涡 Vortex3 的尺寸略有增大, 并且 Vortex3 的位置越来越靠近R2的迎风面, 最终附着在R2的迎风面上。

从图 7(b)中可以看出,270°风向角下,当  $D/C=6.7$  时,气流在 R8 上缘发生强烈的分离,形成较大的旋涡 Vortex-A,在下缘发生较弱的分离,形成较小的旋涡 Vortex-B,大、小旋涡的位置与 90°风

向角下 R1 尾流区的不同。随着纵向间距的减小,旋涡 Vortex-A、Vortex-B 的尺寸趋于一致,并逐渐填满 R7 与 R8 之间的空间。

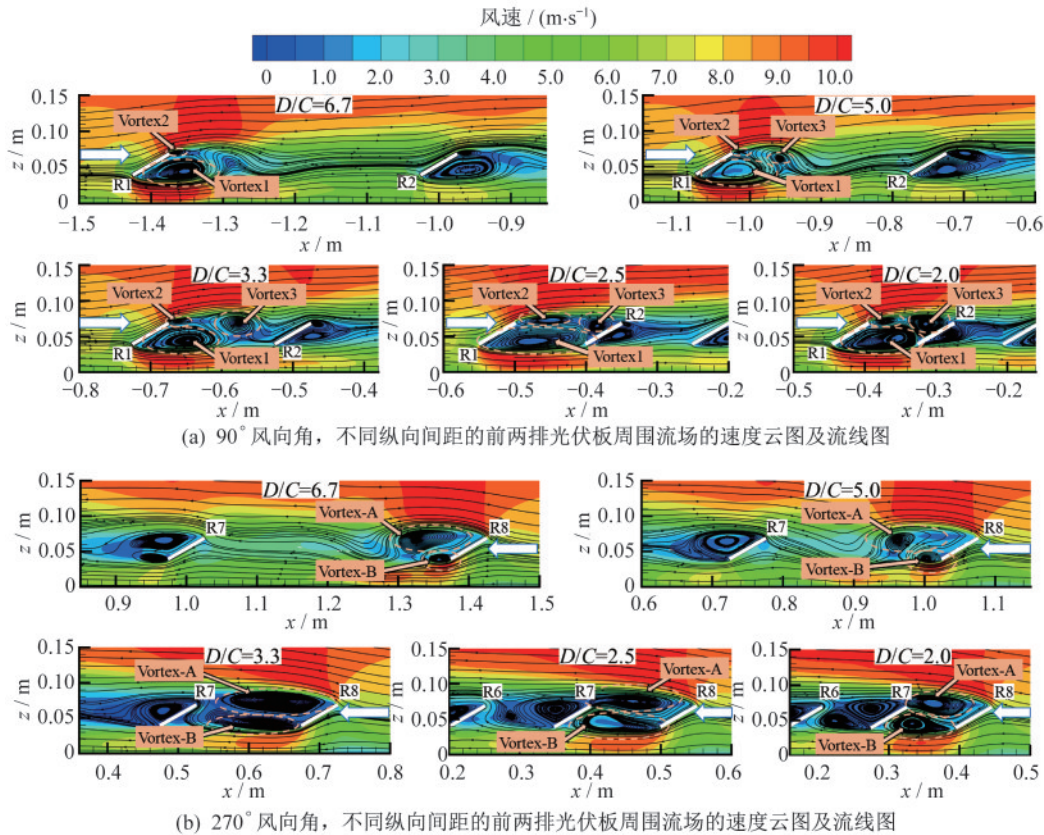


图 7 不同风向下前两排光伏板周围流场的速度云图及流线图

Fig.7 Streamlines in vertical plane of photovoltaic array under different wind directions

综上可知,纵向间距对第一排光伏板尾流区的流场结构有着较为明显的影响,并且随着纵向间距的减小,第二排受第一排尾流的影响增大,其风荷载可能会随着纵向间距的变化发生较为明显的变化。

### 3.2 纵向间距对光伏板净风压系数和净扭矩系数的影响

图 8 给出了不同工况下各排光伏板的净风压系数和净扭矩系数。从图 8(a)和图 8(b)可以看出,90°风向角下,当  $D/C=6.7$  和 5.0 时,光伏阵列中 R1 光伏板的净风压系数和净扭矩系数最大,由于遮挡效应,R2—R5 的风荷载迅速减小并趋于平缓,而 R6—R8 的风荷载相对会略有增大,Jubayer 等<sup>[25]</sup>的数值模拟结果也显示出了相同的规律。

随着纵向间距的减小,各排光伏板的净风压系数和净扭矩系数整体上均有一定程度的减小。

值得注意的是,第二排光伏板的风荷载对纵向间距最为敏感,尤其是 270°风向角下 R7 的净扭矩系数[如图 8(d)所示],当纵向间距比  $D/C$  从 6.7 减小到 3.3 时,R7 的净扭矩系数从 0.05 减小到 0;当  $D/C$  从 3.3 减小到 2.0 时,R7 的净扭矩系数从 0 继续减小到 -0.06。这表明 270°风向角下,R7 在  $D/C=6.7$  时承受较大的正方向扭矩,在  $D/C=3.3$  时正方向扭矩减小为 0;纵向间距比进一步减小时,扭矩的方向发生改变,负方向扭矩随纵向间距比的减小而不断增大。

为了分析纵向间距对第二排光伏板净扭矩系数的影响机理,图 9 给出了第二排光伏板迎风面、背风面扭矩系数随纵向间距比的变化趋势。从图 9 可以看出,随着纵向间距比的减小,两种风向角下第二排光伏板的背风面扭矩系数变化较小,而迎风面扭矩系数先由正值减小到 0,之后变为负值并继续减小。这主要是因为纵向间距较小时,

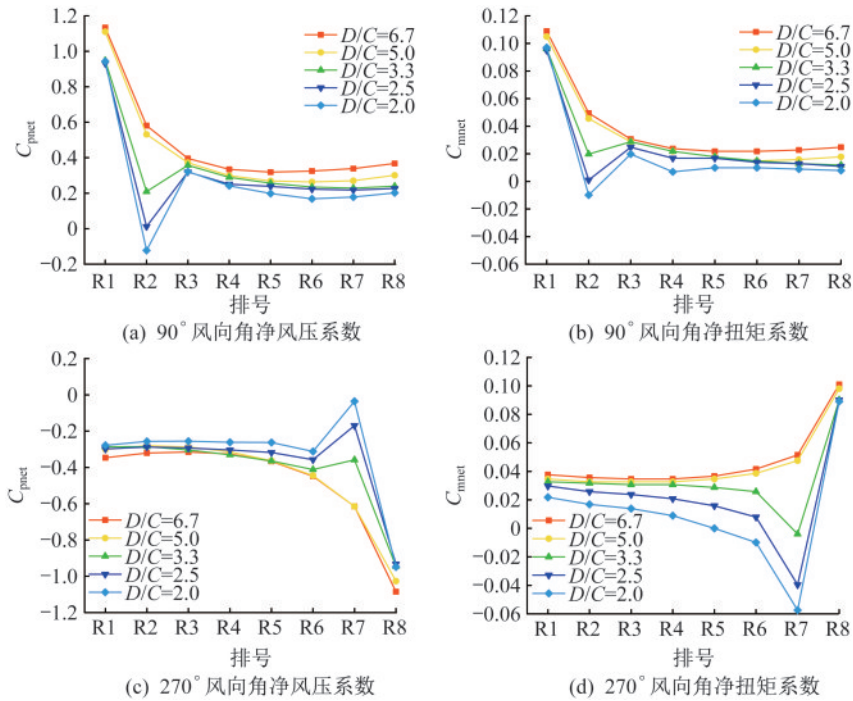


图8 不同工况下的净风压系数和净扭矩系数

Fig.8 Net wind pressure coefficient and net torque coefficient on photovoltaic panels under different wind directions

第一排光伏板背风面的旋涡使第二排光伏板迎风面的风压分布特性发生了较大的变化。

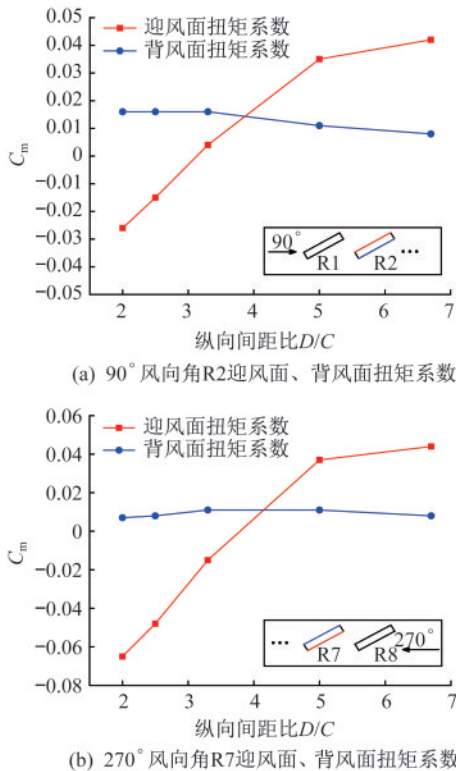


图9 第二排光伏板的迎风面、背风面扭矩系数随纵向间距比的变化情况

Fig.9 Variation of torque coefficient on the windward and leeward side of the second row with the longitudinal spacing ratio

图10进一步给出了第二排光伏板的迎风面风压系数等值线图。从图10(a)中可以看出,当纵向间距比D/C=6.7时,R2光伏板的迎风面(上表面)风压系数等值线呈现出明显的梯度变化,从迎风前缘的0.3渐变到尾缘的-0.1,此时迎风面对于净扭矩的贡献表现为使光伏板承受正方向(方向定义如图3所示)的扭矩。

随着纵向间距的减小,R2迎风面受R1尾流区旋涡的影响增大,R2迎风面风压系数逐渐均变为负值,且迎风前缘的负压强于尾缘,使光伏板承受负方向的扭矩。图10(b)中270°风向角下R7光伏板的迎风面(下表面)风压系数等值线图也展示出相同的规律。

综上所述,纵向间距越小,各排光伏板的风荷载均有一定程度的减小。第二排光伏板的风荷载对纵向间距最为敏感,当纵向间距较小时,其有可能会承受较大的负方向扭矩。

### 3.3 纵向间距对风荷载折减系数的影响

为了进一步分析不同纵向间距下各排光伏板受干扰的程度,以最大纵向间距的光伏阵列中第一排光伏板的风荷载为参考,引入净风压折减系数 $\eta_{C_{pi}}$ 、净扭矩折减系数 $\eta_{C_m}$ ,如式(11)、式(12)所示:

$$\eta_{C_{pi}} = \frac{C_{pnetRi}}{C_{pnet1}} \quad (11)$$

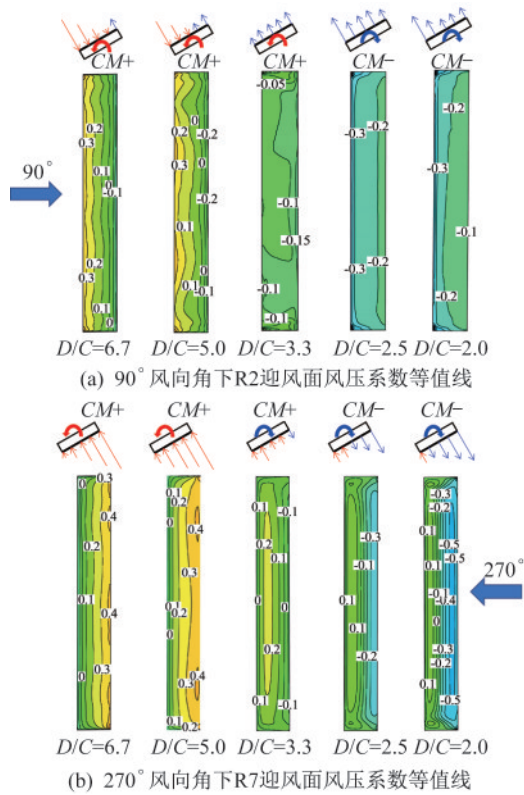


图 10 第二排光伏板迎风面风压系数等值线

Fig.10 Wind pressure coefficient contour on the windward side of the second row under different wind directions

$$\eta_{C_{mi}} = \frac{C_{mnetRi}}{C_{mnet1}} \quad (12)$$

式中： $C_{pnetRi}$ 、 $C_{mnetRi}$  为第  $i$  排光伏板的净风压系数和净扭矩系数； $C_{pnet1}$ 、 $C_{mnet1}$  为纵向间距比  $D/C=6.7$  时第一排光伏板的净风压系数和净扭矩系数。

图 11 给出了风荷载折减系数随纵向间距比的变化情况。如图 11 所示,纵向间距比  $D/C$  从 6.7 减小到 3.3 时,两种风向角下第一排光伏板的净风压折减系数、净扭矩折减系数均由 1.0 减小到 0.85 左右。这是由于随着纵向间距的减小,下游光伏板对上游光伏板背风面区域的气流产生了一定的约束效应,使下游光伏板对上游光伏板所承受的风荷载产生了一定程度的影响。第二排光伏板的风荷载折减系数受纵向间距的影响最为显著,并且  $270^\circ$  风向角下的净扭矩折减系数在纵向间距比较小时出现了较大的负值。 $90^\circ$  风向角下,第三排至第八排的净风压折减系数、净扭矩折减系数随纵向间距比的变化较为平缓。而  $270^\circ$  风向角与  $90^\circ$  风向角不同的是,纵向间距比对第三排 (R6) 净扭矩折减系数的影响相对较为明显,对第四排 (R5) 至第八排 (R1) 净扭矩折减系数的影响程度依次减弱。

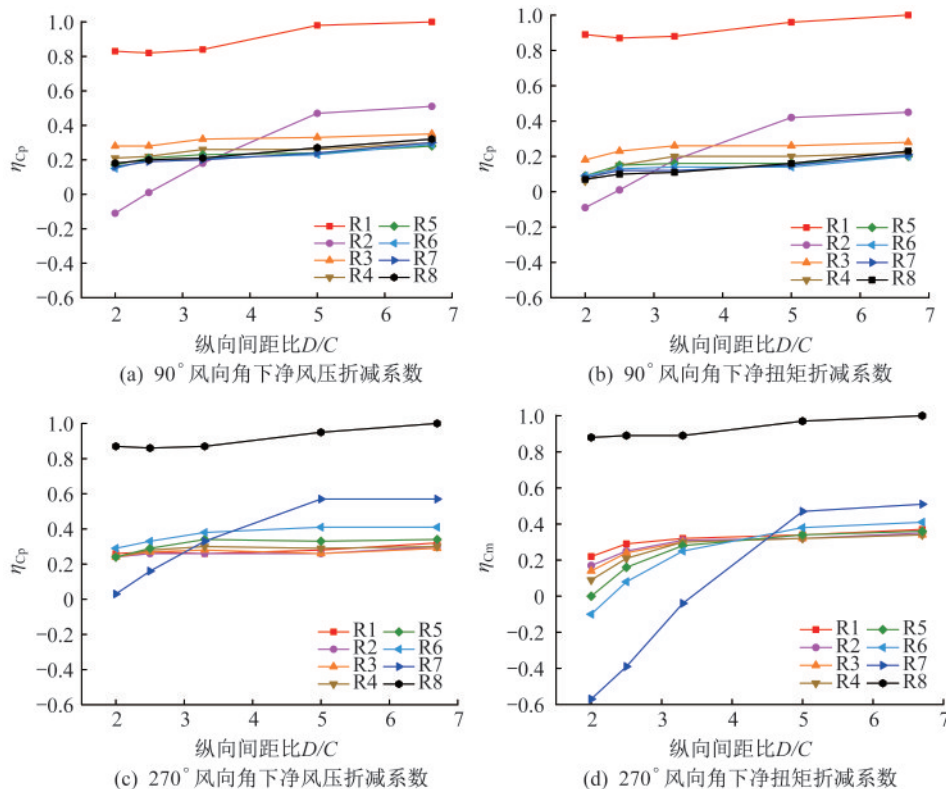


图 11 风荷载折减系数随纵向间距比的变化情况

Fig.11 Variation of wind load reduction factor with the longitudinal spacing ratio under different wind directions

## 4 结 论

本文采用CFD方法对光伏阵列的风荷载进行数值模拟,通过与风洞试验结果对比验证了数值模拟方法的准确性,分析了纵向间距对光伏阵列的流场结构和风荷载的影响,得到以下结论:

(1) 纵向间距对第一排光伏板尾流区的流场结构有着明显的影响。随着纵向间距的减小,第一排光伏板背风面旋涡的数量、尺寸会发生改变,同时旋涡的位置越来越靠近第二排光伏板的迎风面,这会引起第二排光伏板迎风面的风压分布规律发生变化。

(2) 第二排光伏板的风荷载对纵向间距最为敏感。随着纵向间距的减小,第二排光伏板的净风压系数绝对值明显减小,但其迎风面的风压分布规律受第一排光伏板背风面旋涡的影响会发生改变,这导致在纵向间距较小时,第二排光伏板会承受较大的负方向扭矩。

(3) 第三排至第八排光伏板的风荷载受纵向间距的影响相对较小,但总体上随纵向间距的减小而减小。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.光伏发电站设计标准:GB 50797—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of photovoltaic power station: GB 50797—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [ 2 ] 国家能源局.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.  
National Energy Administration. Code for structural design of photovoltaic modules support structures: NB/T 10115—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese)
- [ 3 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [ 4 ] 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 Yunfeng, LI Qingting, YIN Meizi, 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. (in Chinese)
- [ 5 ] 王峰,王佳盈,王子健,等.大长宽比平单轴光伏板风荷载试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(7):130-139.  
WANG Feng, WANG Jiaying, WANG Zijian, et al. Experimental study on wind load of flat uniaxial photovoltaic panels with large aspect ratio [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(7): 130-139. (in Chinese)
- [ 6 ] MA W Y, ZHANG W D, ZHANG X B, et al. Experimental investigations on the wind load interference effects of single-axis solar tracker arrays [J]. Renewable Energy, 2023, 202: 566-580.
- [ 7 ] 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 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. (in Chinese)
- [ 8 ] 马文勇,柴晓兵,马成成.柔性支撑光伏组件风荷载影响因素试验研究[J].太阳能学报,2021,42(11):10-18.  
MA Wenyong, CHAI Xiaobing, MA Chengcheng. Experimental study on wind load influencing factors of flexible support photovoltaic modules [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(11): 10-18. (in Chinese)
- [ 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 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. (in Chinese)

- [10] 张炜,薛建阳,黄华,等.大倾角地面太阳能电池板风荷载数值模拟研究[J].太阳能学报,2021,42(6):138-145.  
ZHANG Wei, XUE Jianyang, HUANG Hua, et al. Numerical simulation of wind load on solar cell panel with high-inclination[J].Acta Energiae Solaris Sinica, 2021,42(6):138-145.(in Chinese)
- [11] 周炜,何斌,蔡晶,等.一类光伏电站架构体系的风荷载特性及折减分析[J].结构工程师,2018,34(2):86-94.  
ZHOU Wei, HE Bin, CAI Jing, et al. Wind load characteristics and reduction analysis of a structural system of photovoltaic power station [J]. Structural Engineers, 2018,34(2):86-94.(in Chinese)
- [12] 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 Yong, WU Jianga, CHEN Yan, 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.(in Chinese)
- [13] 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.  
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.(in Chinese)
- [14] 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 Ning, LI Xuhui, GAO Chenchong, et al. Analysis of shape coefficients of wind loads of photovoltaic system [J].Acta Energiae Solaris Sinica, 2021,42(10):17-22.(in Chinese)
- [15] 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 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. (in Chinese)
- [16] 江继波,章正暘,陆元明,等.考虑弯矩的光伏阵列风荷载数值分析[J].可再生能源,2019,37(1):46-52.  
JIANG Jibo, ZHANG Zhengyang, LU Yuanming, et al. Numerical analysis of wind loads about photovoltaic arrays considering bending moment [J]. Renewable Energy Resources, 2019,37(1):46-52.(in Chinese)
- [17] SHADEMAN M, BARRON R M, BALACH-ANDAR R, et al. Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2014,41(8):728-738.
- [18] 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.
- [19] 阮辉,廖伟丽,王康生,等.光伏阵列表面风荷载数值研究[J].太阳能学报,2015,36(4):871-877.  
RUAN Hui, LIAO Weili, WANG Kangsheng, et al. Numerical research on surface wind load of PV array [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(4):871-877.(in Chinese)
- [20] ZHANG X, MA W, ZHANG Z, et al. Experimental study on the interference effect of the wind-induced large torsional vibration of single-axis solar tracker arrays [J].Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 240:105470.
- [21] ZHANG X, MA W, KANG X, et al. Experimental study of the torsional aeroelastic instability of single-axis solar trackers under different turbulence intensities [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 240:105486.
- [22] ALY MOUSAAD ALY, GIRMA BITSUAMLAK. Aerodynamics of ground-mounted solar panels: Test model scale effects [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123:250-260.
- [23] YANG Y, GU M, CHEN S Q, et al. New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(2):88-95.
- [24] ZHOU X Y, KANG L Y, GU M, et al. Numerical simulation and wind tunnel test for redistribution of snow on a flat roof [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 153:92-105.
- [25] 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.