

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.06.020

大跨度柔性光伏支架阵列极值风荷载与干扰效应

周强¹, 张郁江^{2,3}, 张春伟², 王伯洋², 柯世堂², 王立山⁴, 顾汉富¹

(1. 国家电投集团江苏新能源有限公司, 南京 210003; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106;
3. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 南京 211000; 4. 江苏中压电气工程集团有限公司, 南京
210029)

摘要: 大跨度柔性光伏支架阵列作为一种新型风敏感结构体系, 其纵横向流场干扰相比单排光伏更为复杂, 这导致光伏阵列极值风荷载难以准确预测。以某典型柔性光伏示范项目为例, 首先基于大涡模拟方法分析了单排柔性光伏表面脉动风压特性, 与风洞试验的对比验证了有效性。基于 Davenport 法和 Sadek-Simiu 算法确定了非高斯风荷载峰值因子, 揭示了光伏阵列极值风荷载分布规律。最后系统探讨了阵列风荷载的干扰作用, 从谱分析方法和流场驱动角度对阵列风荷载干扰机理进行了探讨。研究表明大跨度柔性光伏支架阵列极值风荷载在迎风二排处达到最小值, 阵列的干扰效应呈现出各排光伏板静力风荷载逐渐减小且脉动风荷载逐渐增大; 0° 和 180° 风向角下柔性光伏阵列风压干扰系数极值分别为 1.09 和 1.14, 弯矩干扰系数极值分别为 1.49 和 1.21。

关键词: 柔性光伏支架阵列; 大涡模拟; 流场特性; 极值风荷载; 干扰效应

中图分类号: TU352.2; TM615 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2024)06-1161-10

Extreme Wind Load and Interference Effect of Large-Span Flexible Photovoltaic Support Array

ZHOU Qiang¹, ZHANG Yujiang^{2,3}, ZHANG Chunwei², WANG Boyang², KE Shitang²,
WANG Lishan⁴, GU Hanfu¹

(1. State Power Investment Group Jiangsu New Energy Co., Ltd., Nanjing 210003, China; 2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211000, China; 4. Jiangsu Medium Voltage Electrical Engineering Group Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: The large-span flexible photovoltaic support array is a new wind sensitive structure system, and its vertical and horizontal flow field interference is more significant than that of the single-row photovoltaic. The complexities make it difficult to accurately predict the extreme wind load of photovoltaic array. Taking a typical flexible photovoltaic demonstration project as the object, this paper analyzes the wind pressure characteristics of the single-row flexible photovoltaic surface based on the large eddy simulation method and verifies the effectiveness by comparing it with the wind tunnel test. Based on the Davenport method and the Sadek-Simiu algorithm, the peak factor of non-Gaussian wind load is determined and the distribution law of the extreme wind load of photovoltaic array is revealed. Finally, the interrow interference of the array wind load is discussed systematically and the mechanism of the array wind load interference is discussed from the

基金项目: 国家自然科学基金项目(52321165649, 52078251, 52211530086); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(NS2023038, NC2024006)。

收稿日期: 2024-04-20; **修订日期:** 2024-11-21

通信作者: 柯世堂, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: keshitang@163.com。

引用格式: 周强, 张郁江, 张春伟, 等. 大跨度柔性光伏支架阵列极值风荷载与干扰效应[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 1161-1170. ZHOU Qiang, ZHANG Yujiang, ZHANG Chunwei, et al. Extreme wind load and interference effect of large-span flexible photovoltaic support array[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 1161-1170.

perspectives of spectrum analysis and flow field driving. Results show that the extreme wind load of the large-span flexible photovoltaic bracket array reaches the minimum value at the second windward row, and the interrow interference effect of the array presents a decreasing static wind load and an increasing fluctuating wind load. At 0° and 180° wind direction angles, the wind pressure interference coefficients of the flexible photovoltaic array are 1.09 and 1.14, respectively, and the bending moment interference coefficients are 1.49 and 1.21, respectively.

Key words: flexible photovoltaic bracket array; large eddy simulation; flow field characteristic; extreme wind load; interference effect

与传统地面刚性支撑的光伏支架结构相比,柔性光伏支架由柔性索、钢立柱、钢梁和斜拉索或钢斜柱组成,具有高净空、大跨距、低成本且场地灵活等优势,能良好适配农光互补、渔光互补等“光伏+”综合利用模式。然而,作为大跨柔性结构,柔性光伏支架的风敏感特性显著,频繁发生的柔性光伏风毁事件^[1-2]表明风荷载是其结构设计的决定性因素。多排柔性光伏支架组成的阵列体系的风荷载分布及干扰机理更为复杂,因此对大跨柔性光伏支架阵列的极值风荷载确定和干扰效应的系统性研究很有必要。

早期,国内外采用风洞实验方法对屋盖表面附属光伏结构^[3-4]和固定式桩基础^[5-6]的光伏风荷载特性进行了研究,探讨了屋面坡度^[4,7]和板面倾角^[6,8]等因素对光伏板风压分布的影响。文献^[9]在风洞实验的基础上,通过计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法研究了超大型阵列光伏板体型系数分布规律。诸多学者对固定式光伏的研究成果已在规范^[10]中得以体现。随着柔性光伏结构的发展,气弹风洞实验^[11-12]和CFD/计算结构动力学(Computational structural dynamics, CSD)耦合数值模拟^[13-14]方法成为主要研究手段,研究内容包括板面风荷载^[15-16]、气弹响应^[17-18]、振动控制^[12]等方面。然而,现有研究忽略了柔性光伏组件风荷载的非高斯特性,且研究对象集中于单排的柔性支撑光伏组件结构,多排光伏阵列的干扰仅考虑静风作用,涉及干扰效应机理的研究仍处于空白。

鉴于此,以中国东部沿海地区某66 MW“渔光互补”示范基地为研究对象,首先通过大涡模拟方法获得单排柔性光伏结构表面气动力方程,并与风洞试验结果作对比,验证了数值模拟方法的有效性。在此基础上,分析柔性光伏阵列各排光伏板面的风荷载特性,通过两种典型极值风压算法确定了风荷载峰值因子和风荷载极值分布规律。接着系统探讨了光伏阵列排间位置对风荷载的干扰作用,基于风荷载谱分析结果和阵列流场分布对干扰作用的作用机理进行了研究。

1 数值模拟

1.1 工程概况简介

以中国东部沿海地区某66 MW“渔光互补”示范基地的大跨柔性光伏支架阵列为研究对象,如图1所示。该设计方案中柔性光伏支架结构由光伏板、组件索、承重索、三角撑、交叉撑、立柱和斜拉索组成,单跨跨度40 m,由32块光伏板组成,单板尺寸为2 278 mm×1 134 mm×30 mm,单片光伏板倾角为 21° ,光伏板中心离地高度4 m,光伏阵列排间距3.8 m。



图1 66 MW 示范基地大跨柔性光伏支架阵列示意图

Fig.1 Overall top view of 66 MW large-span flexible photovoltaic support array

1.2 数值模拟方法

大涡模拟能对流体域中所有位置的大尺度湍流进行直接求解,并对小尺度涡流运动采用亚格子方法建模,从而获得详细湍流场动态信息。大涡模拟法中,滤波后描述黏性不可压缩流体动量守恒的Navier-Stokes方程^[19]可表述为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} = - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; t 为时间; ν 为空气运动黏性系数; \bar{u} 为滤波后方向的速度; x 为空间3个方向坐标分量, $i=1,2,3, j=1,2,3$; \bar{P} 为滤波后的压力; τ_{ij} 为大涡模拟方法中亚格子尺度的雷诺应力。本文采用壁面适应局部涡黏模型(Wall-adapting local eddy-viscosity, WALE)^[20]亚格子模型进行大涡模拟方程封闭,WALE模型中涡黏系数定义为

$$v_{sgs} = (C_\omega \Delta)^2 \frac{(S_g^d S_g^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_g^d S_g^d)^{5/4}} \quad (3)$$

式中: $C_\omega = 0.5$; Δ 为滤波尺度; \bar{S} 为应变率张量, $S_{ij}^d = 1/2 (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - 1/3 \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2$, $\bar{g}_{ij} = \partial \bar{u}_i / \partial \bar{x}_j$ 。由此可得亚格子尺度的雷诺应力为

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\nu_{sgs} \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

本文数值模拟方法的场风介质选用不可压缩流体,采用SIMPLEC方法进行离散方程组的求解以匹配大涡模拟计算要求,采用二阶对流项求解格式。在数值风洞实验中,按照1:1缩尺比建立足尺模型,并按迎风顺序将各排光伏板依次命名为 $P_1 \sim P_5$ 。具体参数及入流方向设置如图2所示。

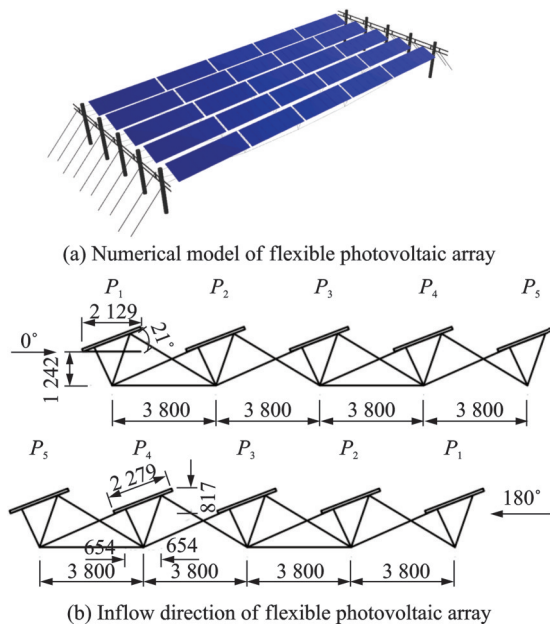


图2 柔性光伏阵列体系数值模型

Fig.2 Numerical model of flexible photovoltaic array system

计算域和边界条件如图3(a)所示,光伏板测点布置如图3(b)所示。图中, H 为光伏板上缘离地高度,为了使流动得到充分发展,计算模型前缘距离计算域入口为 $5H$,出口位置距离模型 $15H$ 。入口边界条件为速度入口,出口采用压力出口边界条件;计算域侧面采用对称边界条件;计算域顶部

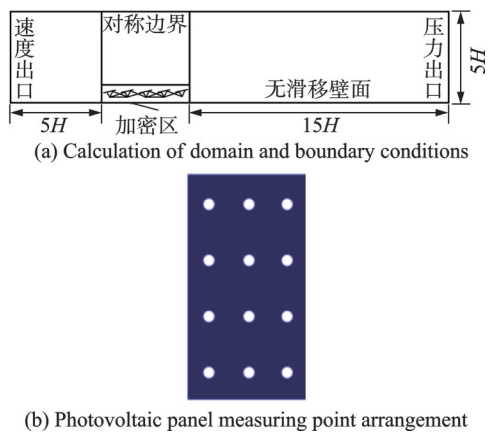


图3 边界条件与测点布置

Fig.3 Boundary conditions and measuring point arrangement

采用自由滑移边界条件;地面以及构造物表面采用无滑移边界条件。每块光伏板上下表面各布置12个监控点,每排共设置 $32 \times 12 \times 2 = 768$ 个监控点。

为了更好地兼顾计算效率与精度,将计算域划分为局部加密区域和外围非加密区域。外围区域用结构化网格进行划分;局部加密区域包含柔性光伏支架足尺模型,采用非结构化多面体网格进行划分。以 0° 风向角下单排柔性光伏支架算例进行网格无关性验证,图4给出了不同网格方案下网格质量和整排平均风压系数的均值。由图4可知,各网格方案的整排光伏板平均风压系数均值计算结果相差不超过5%,其中611万网格数的网格最小正交质量系数为0.027,大于 $1e-5$,网格最大歪斜度为 74.79° ,小于 85° ,两方面均能满足网格质量要求。为保证多排计算工况网格数量保持在合理范围,选取611万网格数方案作为最终的网格划分方案。

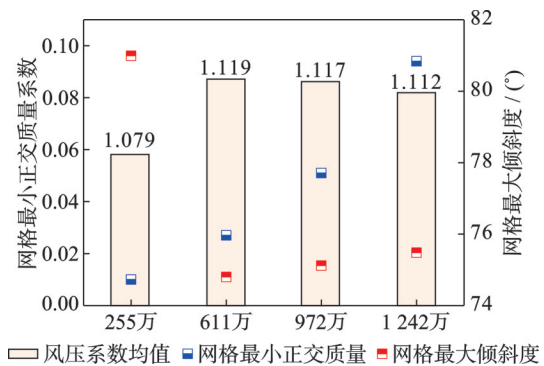


图4 网格无关性验证

Fig.4 Grid independence verification

1.3 风洞测压实验

实验模型采用1:50几何缩尺比,选用硬质塑料材质制作光伏板,支座和索件分别选用铝材和钢材,确保表面几何相似的同时保证模型具有足够的强度和刚度。每跨由5块矩形光伏单元组成,具体尺寸及构件表面测点布置如图5所示。实验采用同步扫描测压技术,测压信号采样频率为330 Hz,单个工况采样时长为30.2 s。

模型参考高度处风速为4.5 m/s,图6给出了实验风场平均风剖面、湍流度剖面和脉动风谱,可见平均风剖面、湍流度剖面与规范吻合良好,同时对脉动风谱进行拟合,并与Davenport谱、Harris谱及Karman谱对比,结果表明脉动风谱满足要求。

1.4 风洞实验结果对比验证

图7给出了数值模拟与风洞实验的跨中位置光伏单元1表面风压分布结果,由上至下分别为上表面、下表面及净风压。由图7可知,数值模拟和风洞实验 0° 风向角下单排光伏板跨中单元风压分

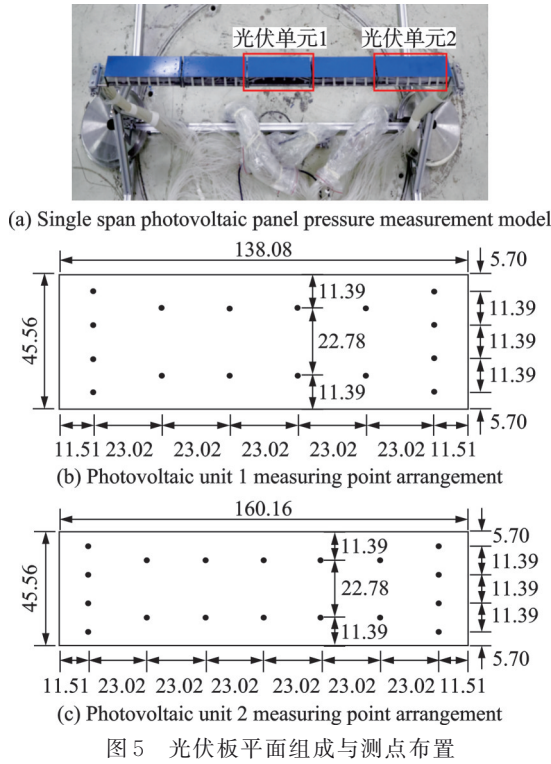


图5 光伏板平面组成与测点布置

Fig.5 Photovoltaic panel plane composition and measuring point arrangement

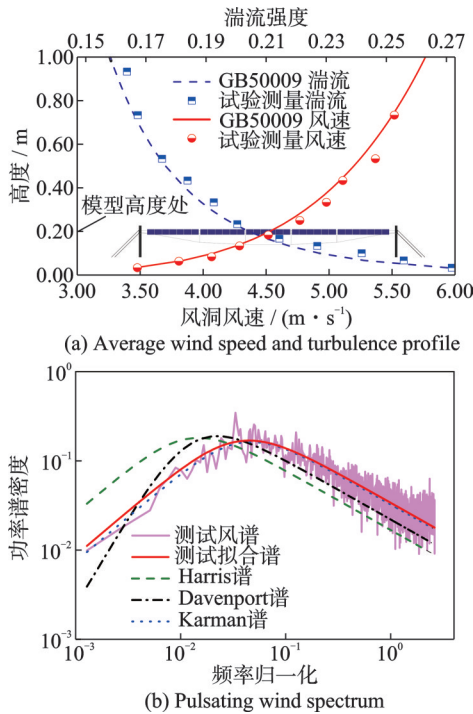


图6 风洞中B类风场模拟效果

Fig.6 Simulation effect of Class B wind field in wind tunnel
布规律一致,上表面为迎风面受正压,下表面为背风面受负压,净风压表现为风压作用。

根据光伏板面净风压分布结果,分别设置光伏板的量纲为一压力系数 U_s 与弯矩系数 C_m 等效研究柔性光伏支架为所受风荷载的压力和弯矩作用。数值模拟风洞实验中光伏板的压力及弯矩系数沿排间分布分别见图8,数值模拟与风洞实验的

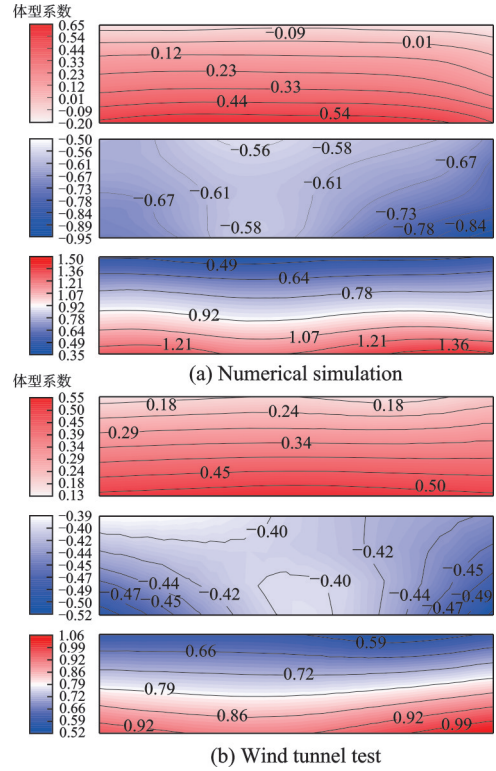


图7 0°风向角单排光伏板跨中单元表面风压分布图

Fig.7 Wind pressure distribution diagrams of single row photovoltaic panel at 0° wind direction in the middle span

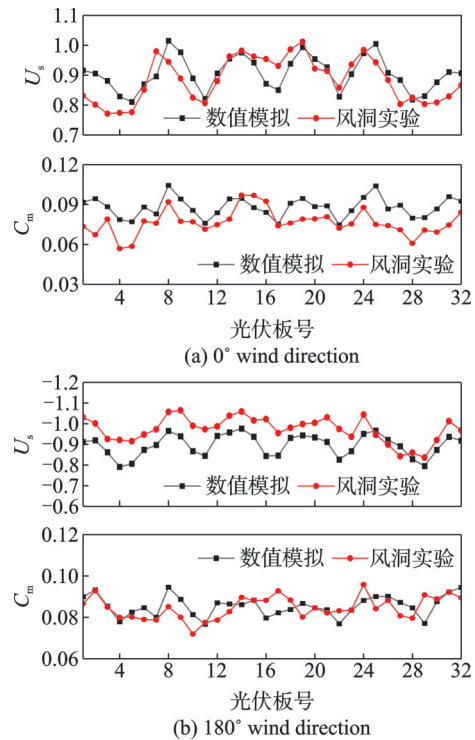


图8 单排光伏板风压系数与弯矩系数曲线

Fig.8 Wind pressure coefficient and bending moment coefficient curves of single row photovoltaic panel

结果表现出良好的一致性,以三角支撑处光伏板为波谷具有明显的周期性分布特征,越靠近相邻三角支撑间中部位置光伏板体型系数越大。这说明现

有数值模拟方案能真实反映柔性光伏支架的受风荷载情况。

2 极值风荷载特性

2.1 阵列平均风荷载分布

图 9 给出了柔性光伏阵列光伏板表面风荷载分布曲线,各排光伏板风压体型系数在最大值上的大小关系如下: $P_1 > P_3 > P_4 > P_5 > P_2$ 。 P_1 排的风压体型系数沿排间分布规律与单排类似,具有明显的周期性分布规律; P_2 排风压体型系数骤降, $P_3 \sim P_5$

排端部位置的光伏板风压系数明显小于其余位置光伏板。 $P_1 \sim P_3$ 排的弯矩体型系数表现出周期性波动特性,其中 P_2 排的弯矩体型系数在 0° 风向角下沿跨间正负交替, 180° 风向角下整体受负弯矩作用; P_3 及后排的光伏板所受弯矩基本一致,且端部位置光伏板弯矩体型系数变化剧烈。

2.2 脉动荷载非高斯特性

图 10(a)给出了 0° 风向角下各排光伏板风测点风压信号的斜度峰度分布结果,可以看出光伏板表面测点风压信号具明显的“左偏斜”和“高峰值”的非高斯特性。以 0.05 的显著性水平对各测点风压信号进行 Jarque-Bera 检验,按照迎风前缘、迎风后缘、背风前缘、背风后缘及结构整体对测点信号所在区域进行划分,探究各区域风压信号非高斯特性分布规律。图 10(b)表明,不同区域信号的非高斯特性具有显著区别,随着所在光伏板排数增加,背风面的非高斯信号占比呈上升趋势,而迎风面非高斯信号占比下降。虽然后排信号整体的非高斯特性有所减弱,但仍有超过 89% 的信号为非高斯信号。

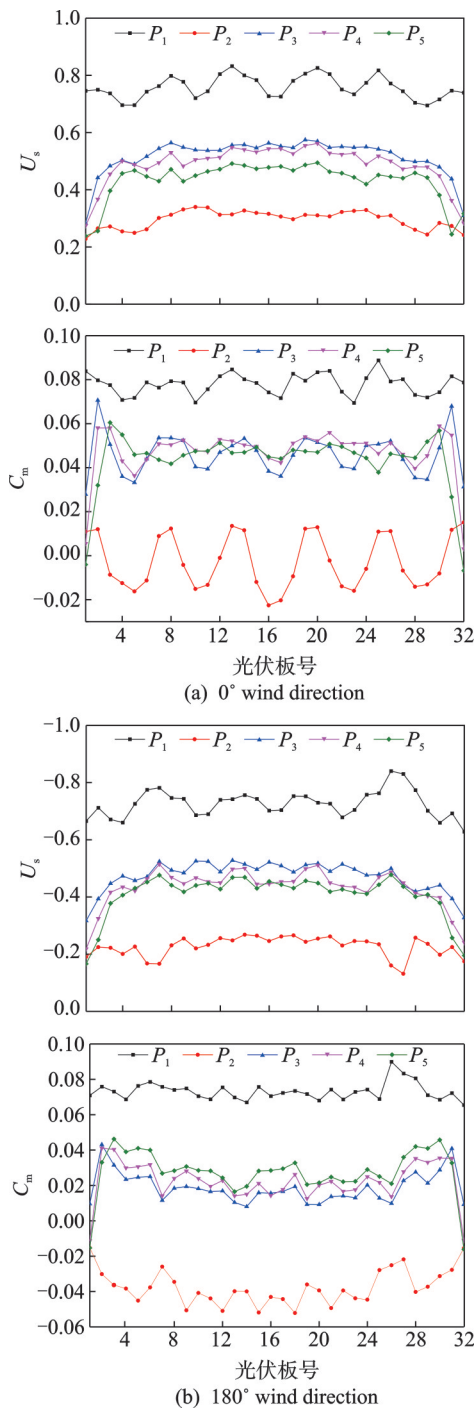


图 9 柔性光伏阵列光伏板表面风荷载分布曲线
Fig.9 Wind load distribution curves on the surface of a flexible photovoltaic array

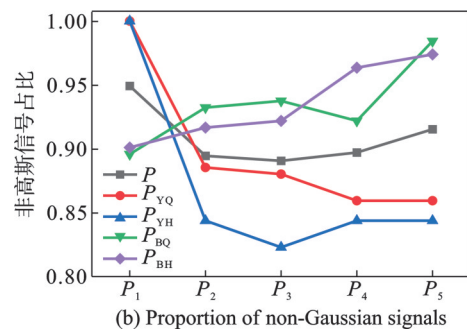
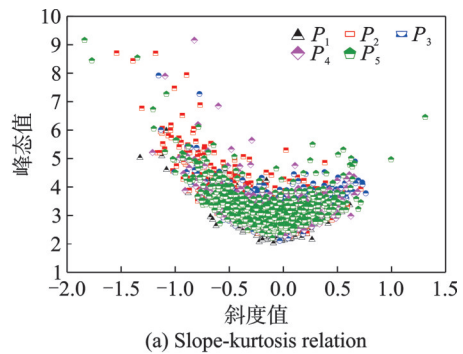


图 10 柔性光伏阵列测点信号非高斯特性

Fig.10 Non-Gaussian characteristics of measuring point signal of flexible photovoltaic array

图 11 给出了各排光伏板整体风荷载的非高斯特性。以 0° 风向角为例,各排风压信号非高斯占比均达到 75%,沿排向先减小后增大,最高占比出现在 P_4 和 P_5 位置,达到 87.5%;弯矩信号的非高斯特性沿排向逐渐减弱至 P_5 最小,但仍有超过 65% 的弯矩信号具有非高斯特性。 180° 风向角下风荷载的非高斯性更加明显,风压非高斯占比最高达

96.9%，出现在 P_1 位置，弯矩非高斯占比最高为 100%，出现在 P_2 位置。

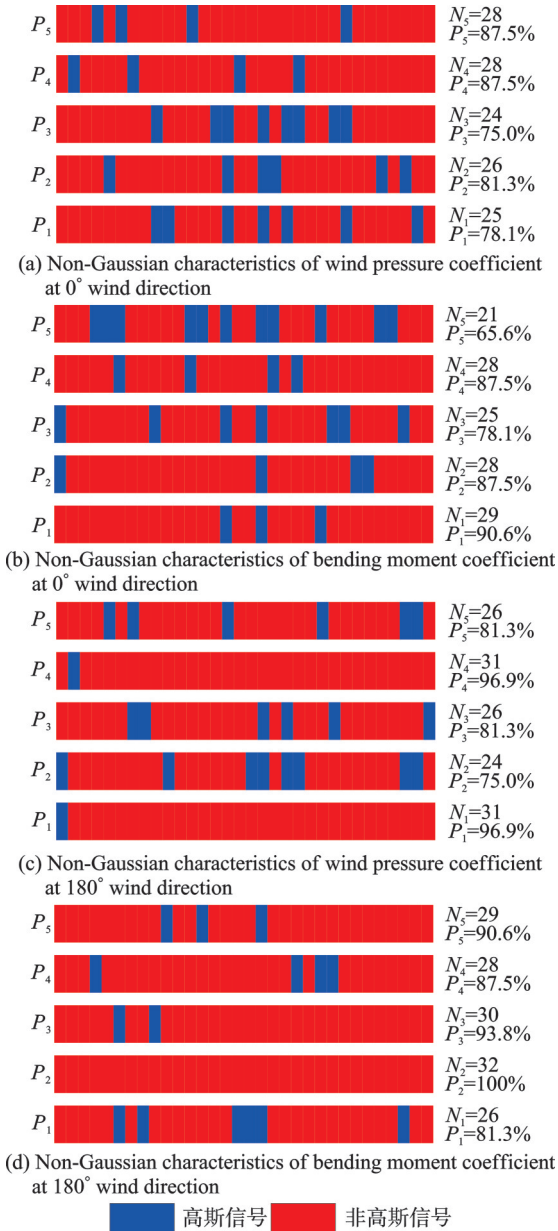
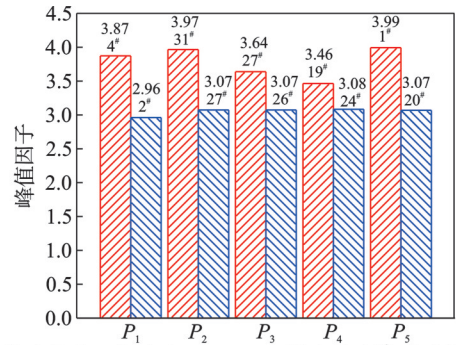


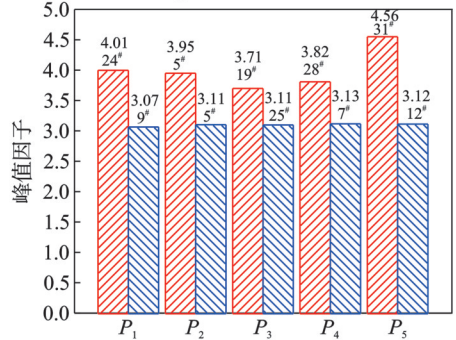
图 11 柔性光伏阵列各排光伏板整体荷载非高斯特性示意图
Fig.11 Global load non-Gaussian characteristics of each row of photovoltaic panels of flexible photovoltaic array

2.3 阵列极值风荷载确定

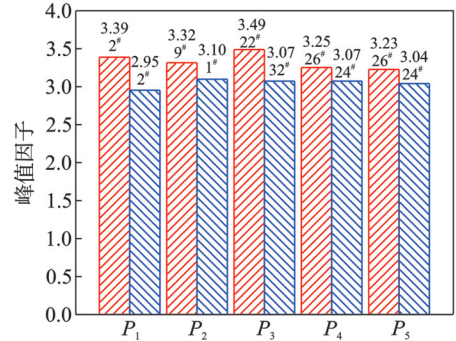
使用基于高斯分布假定的 Davenport 法和针对非高斯过程的 Sadek-Simiu 法两种方法，分别计算柔性光伏阵列的峰值因子，并选取各排峰值因子最大值作为特征参数。由图 12 柔性光伏阵列各排峰值因子可知两种方法计算得出的结果差异较大，基于高斯分布假定的 Davenport 法计算得出的数值偏低，且沿排向基本无变化。0° 风向角下，风压和弯矩荷载的峰值因子相差最大分别达到 30.7% 和 46.0%。因此，在确定柔性光伏阵列的峰值因子



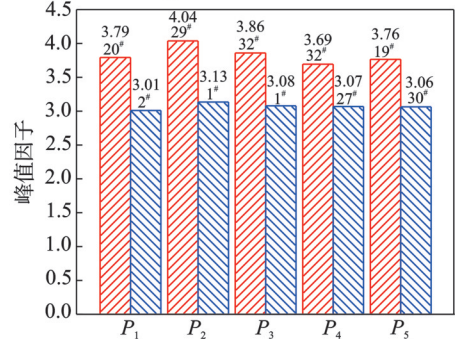
(a) Peak factor of wind pressure coefficient at 0° wind direction



(b) Peak factor of bending moment coefficient at 0° wind direction



(c) Peak factor of wind pressure coefficient at 180° wind direction



(d) Peak factor of bending moment coefficient at 180° wind direction
Sadek-Simiu法 Davenport法

图 12 柔性光伏阵列各排峰值因子

Fig.12 Peak factor of each row of flexible photovoltaic array

取值时，忽略其非高斯过程存在相当风险，将采用 Sadek-Simiu 法得出的峰值因子确认阵列的极值风荷载大小。

图 13 给出了柔性光伏阵列的极值体型系数分布曲线。由图 13 可知，极值风荷载整体分布规律与平均风荷载基本一致，在 P_2 排骤减， P_3 排恢复后再缓慢递减。极值风压的最不利位置出现在 $P_3 \sim P_5$ 排三角支撑处的光伏板，其正压和负压最大值分别为 1.06 和 -1.09，超过 P_1 排极值风压

12.76% 和 18.48%。极值正弯矩的最不利位置出现在 0° 风向角下 $P_3 \sim P_5$ 排相邻两三角支撑中部的

光伏板,为 0.15;极值负弯矩的最不利位置出现在 180° 风向角下 P_2 排,为 -0.12 。

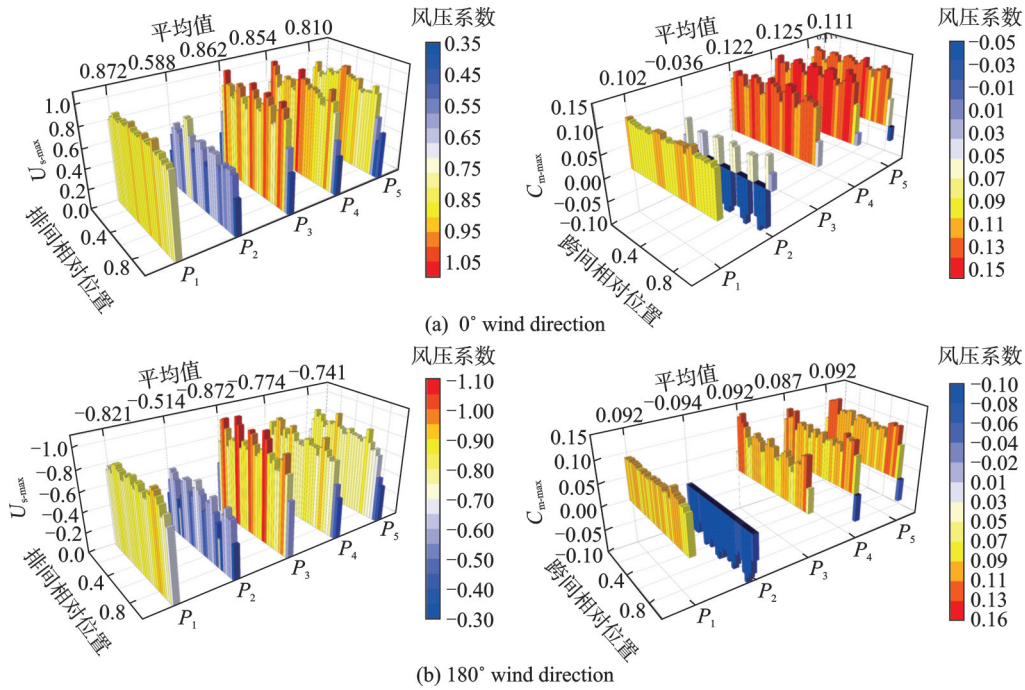


图 13 柔性光伏阵列各排极值风荷载分布

Fig.13 Extreme wind load distribution of each row of flexible photovoltaic array

3 阵列干扰效应

3.1 干扰效应量化

表 1 和 2 分别给出了静力、动力和极值干扰因子分布情况。由表 1 和 2 可知:(1)静力干扰因子

绝对值不超过 1,阵列结构的静风干扰效应整体表现为减小,静风荷载沿排间先骤减后有所恢复再逐渐减小,在 P_2 处静风干扰效应最为显著;(2)动力干扰因子均大于 1,阵列结构的动力干扰效应整体

表 1 柔性光伏阵列 U_s 最不利干扰因子

Table 1 Maximum interference factor of flexible photovoltaic array U_s

位置	U_s 干扰因子					
	0° 风向角			180° 风向角		
	静力	动力	极值	静力	动力	极值
P_1	0.91(11 $^\circ$)	1.44(25 $^\circ$)	0.94(4 $^\circ$)	0.93(28 $^\circ$)	1.54(20 $^\circ$)	0.94(28 $^\circ$)
P_2	0.41(11 $^\circ$)	3.34(9 $^\circ$)	0.80(11 $^\circ$)	0.31(28 $^\circ$)	3.74(31 $^\circ$)	0.72(16 $^\circ$)
P_3	0.67(22 $^\circ$)	3.68(23 $^\circ$)	1.09(4 $^\circ$)	0.62(22 $^\circ$)	4.78(3 $^\circ$)	1.14(4 $^\circ$)
P_4	0.64(17 $^\circ$)	3.70(12 $^\circ$)	1.08(4 $^\circ$)	0.57(7 $^\circ$)	5.16(20 $^\circ$)	0.98(4 $^\circ$)
P_5	0.58(5 $^\circ$)	4.31(7 $^\circ$)	0.97(5 $^\circ$)	0.54(16 $^\circ$)	5.01(20 $^\circ$)	0.94(5 $^\circ$)

表 2 柔性光伏阵列 C_m 最不利干扰因子列表

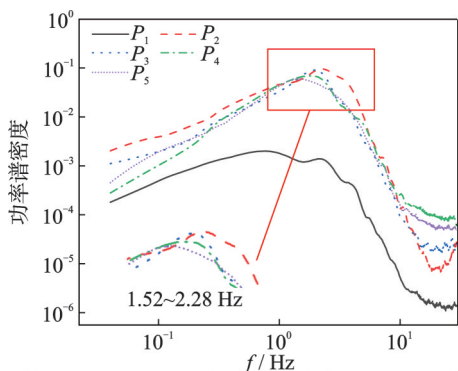
Table 2 Maximum interference factor of flexible photovoltaic array C_m

位置	C_m 干扰因子					
	0° 风向角			180° 风向角		
	静力	动力	极值	静力	动力	极值
P_1	1.00(22 $^\circ$)	1.20(22 $^\circ$)	1.09(22 $^\circ$)	1.00(26 $^\circ$)	1.14(20 $^\circ$)	0.95(26 $^\circ$)
P_2	-0.27(17 $^\circ$)	3.50(12 $^\circ$)	-1.01(11 $^\circ$)	-0.62(18 $^\circ$)	2.97(15 $^\circ$)	-1.17(16 $^\circ$)
P_3	0.75(2 $^\circ$)	4.23(22 $^\circ$)	1.47(22 $^\circ$)	0.46(2 $^\circ$)	4.64(3 $^\circ$)	1.21(3 $^\circ$)
P_4	0.68(22 $^\circ$)	4.35(18 $^\circ$)	1.49(22 $^\circ$)	0.47(3 $^\circ$)	4.01(12 $^\circ$)	1.14(6 $^\circ$)
P_5	0.70(4 $^\circ$)	3.73(18 $^\circ$)	1.42(22 $^\circ$)	0.54(3 $^\circ$)	4.31(6 $^\circ$)	1.18(6 $^\circ$)

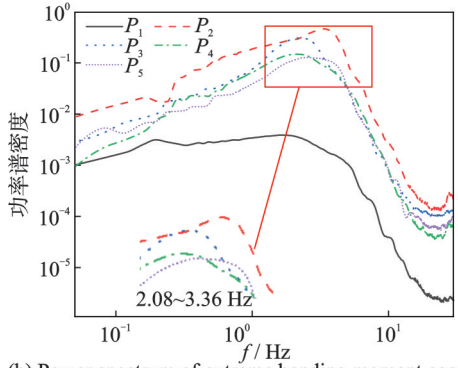
表现为增大,且迎风后排对动力干扰效应敏感程度显著大于迎风首排;(3)极值干扰因子最大出现在 $P_3 \sim P_5$ 排, P_2 排风压极值干扰因子最小,负弯矩极值干扰因子最大;(4)与 0° 风向角相比, 180° 风向角下风压荷载的动力增大效应和弯矩荷载的静力减小效应更为明显。对于其余排数的光伏阵列,5排后阵列间干扰效应分布应保持现有趋势,并趋于收敛;极值风荷载控制位置可对其他排数的情况进行包络,根据排数不同,出现在迎风首排或3排。

3.2 功率谱干扰分析

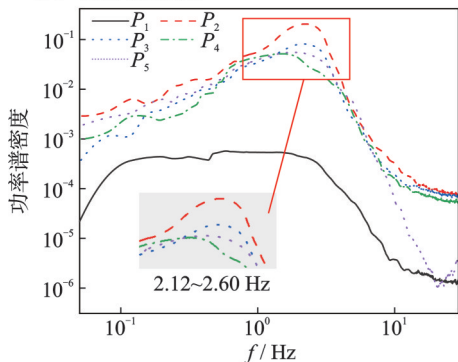
图14给出了柔性光伏阵列各排极值干扰最不利位置的整体风荷载体型系数的功率谱。由图14可知, P_1 排风荷载的低频段功率谱曲线平缓,功率谱幅值整体远小于 $P_2 \sim P_5$ 排。 $P_2 \sim P_5$ 排风荷载功率谱曲线基本一致,具有明显峰值,且谱峰频率相对集中。以 P_2 排为例,风压荷载在2.28 Hz达到峰值后快速衰减,弯矩荷载的谱峰频率最大达到3.36 Hz。



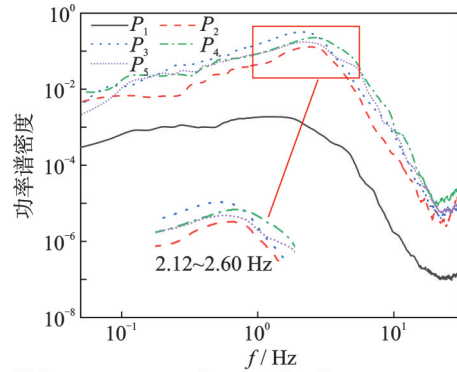
(a) Power spectrum of extreme wind pressure coefficient at 0° wind direction



(b) Power spectrum of extreme bending moment coefficient at 0° wind direction



(c) Power spectrum of extreme wind pressure coefficient at 180° wind direction

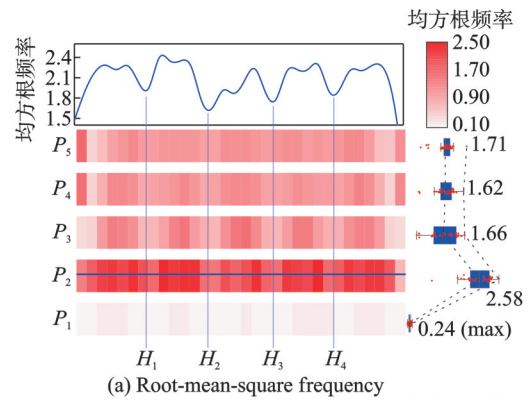


(d) Power spectrum of extreme bending moment coefficient at 180° wind direction

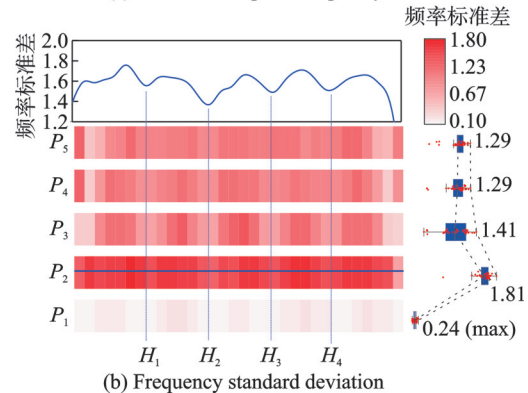
图14 柔性光伏阵列极值风荷载最不利位置光伏板整体风荷载功率谱

Fig.14 Overall wind load power spectrum of flexible photovoltaic array in the most unfavorable position of extreme wind load

对 0° 风向角下柔性光伏阵列弯矩系数的功率谱特征值进行分析,其中图15(a)为均方根频率,图15(b)为频率标准差。分析可知, $P_2 \sim P_5$ 排弯矩荷载的均方根频率和频率标准差较 P_1 排有不同程度的提高,其中又以 P_2 排影响最为显著, $P_3 \sim P_5$ 排基本一致。这说明迎风后排光伏板弯矩荷载中的能量分布趋于分散。同时,光伏板弯矩荷载功率谱特征值在跨度方向上具有周期性波动的特点,以 P_2 排为例,图中各 $H_1 \sim H_4$ 所代表横向联系位置的光伏板弯矩荷载功率谱特征值显著小于其余位置。



(a) Root-mean-square frequency



(b) Frequency standard deviation

图15 0° 风向角柔性光伏阵列弯矩系数功率谱特征值
Fig.15 Power spectrum characteristic values of bending moment coefficient of flexible photovoltaic array at 0° wind angle

3.3 流场驱动机制

柔性光伏阵列间干扰效应的成因主要包括上游光伏板脱落的漩涡影响和下游结构对自身尾流发展的干扰。图 16 给出了 0° 风向角下阵列及周围区域的流场分布,图 16 中蓝色、绿色、红色分别为 15、25 和 35 m/s 的风速轮廓线。X-Y 平面流场表明来流在通过阵列后衰减至 25 m/s,阵列内部风速更低,通常在 15 m/s。阵列两端沿来流方向逐步形成了锥形的局部高风速区。跨中 X-Z 截面流场分布表明来流沿光伏板间形成狭长的低速区域 2 并向后延伸,并在首排光伏板上缘的局部范围 1 以及光伏板与地面间大片区域 3 形成高风速区。

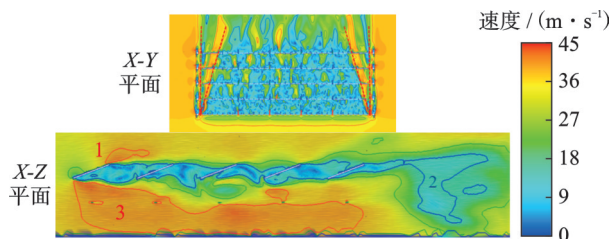


图 16 柔性光伏阵列不同速度流线
Fig.16 Different speed flows of flexible photovoltaic array

图 17 给出了不同时空位置的代表性流场分布。可以看到, P_1 排光伏板对来流的扰动具有时空上的连贯性,使 $P_1 \sim P_2$ 排光伏板间区域维持在低风速状态,这导致 P_2 排光伏板上下表面压力分布基本一致,所受净风压较首排骤减。 $P_2 \sim P_3$ 、 $P_3 \sim P_4$ 、 $P_4 \sim P_5$ 的排间低风速区域表现出了时间上的不稳定性与空间上的不连续性。空间上的不连续性导致了后排光伏上下表面区域风速出现了显著差异,使净风压均值有所恢复,而时间上的不稳定性增强了后排光伏板风荷载脉动性。

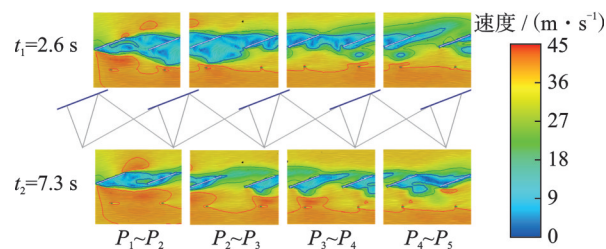


图 17 柔性光伏阵列不同排间位置的流场分布
Fig.17 Flow field distributions between different rows of flexible photovoltaic array

以 Q-Criterion 为准则,图 18 给出了典型时刻各位置涡量分布情况,其中白色涡量轮廓线由内至外依次为 1 000、500、250 和 100/s⁻¹。可以看到, P_1 光伏板上下缘有规律性涡交替脱落现象,首排的漩涡在 P_2 光伏板表面再附着,与主流共同生成二排的分离涡并再次脱落。 P_2 排后的光伏板既可以独

立从主流中生成分离涡,这种涡尺寸较小,大多直接耗散;还可以和来自前排的涡叠加生成更大尺度的涡结构,这种涡经过多次叠加并不断从主流中吸取能量,流向尺寸持续增大。

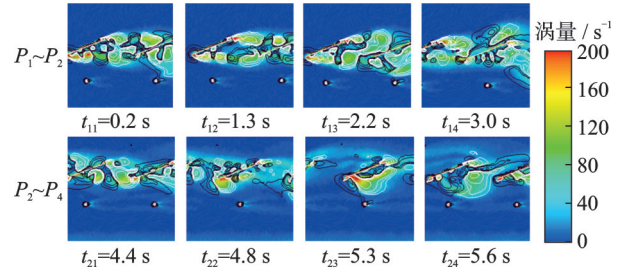


图 18 柔性光伏阵列典型时刻不同排间位置涡量分布
Fig.18 Vorticity distributions of flexible photovoltaic array at different positions between rows at a typical time

4 结 论

(1) 基于 Sadek-Simiu 法得到的峰值因子明显大于基于 Davenport 法计算得出的峰值因子,在极值风荷载计算中忽略荷载的非高斯特性是偏危险的; 0° 和 180° 风向角下,光伏板所受的极值压力最大的位置出现在迎风三、四排,且迎风二排光伏板受极值负弯矩作用。

(2) 柔性光伏阵列风荷载的干扰表现为减小后排光伏板静风作用,沿排向有先骤减后增大再缓慢减小的趋势;增大后排脉动作用,沿排向表现为 $(P_3 \sim P_5) > P_2 > P_1$; 180° 风向角下干扰效应较 0° 更为强烈。

(3) 以极值风荷载为基准,柔性光伏阵列迎风后三排略大于首排,迎风二排最小;风压干扰系数和弯矩干扰系数在 0° (180°) 风向角取值分别为 1.09 和 1.49 (1.14 和 1.21)。

(4) 来流通过光伏阵列沿光伏板上下缘形成了狭长的低速区域,后排光伏板的排间低风速区域在时间上的不稳定性与空间上的不连续性是导致静风干扰的主要原因;后排光伏阵列排间复杂的漩涡脱落、再附着、再分离现象是迎风后排风荷载脉动性陡然增加的重要原因。

参考文献:

[1] PANTUA C A J, CALAUTIT J K, WU Y P. Sustainability and structural resilience of building integrated photovoltaics subjected to typhoon strength winds [J]. Applied Energy, 2021, 301: 117437.
[2] JACKSON N D, GUNDA T. Evaluation of extreme weather impacts on utility-scale photovoltaic plant performance in the United States[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117508.
[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] 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.
- [5] 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.
- 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.
- [6] PANTUA C A J, CALAUTIT J K, WU Y P. Sustainability and structural resilience of building integrated photovoltaics subjected to typhoon strength winds[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117437.
- [7] LI Jiayang, TONG Lewei, WU Jianming, et al. Numerical investigation of wind pressure coefficients for photovoltaic arrays mounted on building roofs[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23: 3606-3615.
- [8] BABATUNDE A A, ABBASOGLU S, SENOL M. Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 1017-1026.
- [9] 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.
- [10] 电力规划设计总院. 光伏支架结构设计规程[M]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [11] KIM Y C, TAMURA Y, YOSHIDA A, et al. Experimental investigation of aerodynamic vibrations of solar wing system[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(15): 2217-2226.
- [12] HE Xuhui, DING Hao, JING Haiquan, et al. Wind-induced vibration and its suppression of photovoltaic modules supported by suspension cables[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206: 104275.
- [13] YEMENICI O, AKSOY M O. An experimental and numerical study of wind effects on a ground-mounted solar panel at different panel tilt angles and wind directions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 213: 104630.
- [14] SUÁREZ J L, CADENAS D, RUBIO H, et al. Vortex shedding dynamics behind a single solar PV panel over a range of tilt angles in uniform flow[J]. Fluids, 2022, 7(10): 322.
- [15] ESTEPHAN J, CHOWDHURY A G, IRWIN P. A new experimental-numerical approach to estimate peak wind loads on roof-mounted photovoltaic systems by incorporating inflow turbulence and dynamic effects[J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113739.
- [16] 杜航, 徐海巍, 张跃龙, 等. 大跨柔性光伏支架结构风压特性及风振响应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 67-74.
- DU Hang, XU Haiwei, ZHANG Yuelong, et al. Wind pressure characteristics and wind vibration response of long-span flexible photovoltaic support structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(10): 67-74.
- [17] 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.
- 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.
- [18] XIONG H, EGUSQUIZA M, ØSTERGAARD P A, et al. Multi-objective optimization of a hydro-wind-photovoltaic power complementary plant with a vibration avoidance strategy[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117459.
- [19] 徐璐, 柯世堂. 超大型冷却塔施工全过程风荷载频域特性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 150-160.
- XU Lu, KE Shitang. Frequency domain characteristics analysis for wind loads during construction of super large cooling tower[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 150-160.
- [20] RASTHOFER U, GRAVEMEIER V. Recent developments in variational multiscale methods for large-eddy simulation of turbulent flow[J]. Archives of Computational Methods in Engineering: State of the Art Reviews, 2018, 25(3): 647-690.