

引文格式:解晓楠,邱冶,王菲,等. 柔性光伏阵列风致响应与风振系数的大涡模拟研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4):870-879.

XIE Xiaonan, QIU Ye, WANG Fei, et al. Large-eddy simulation on wind-induced responses and wind vibration coefficients of flexible photovoltaic arrays[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4):870-879.

柔性光伏阵列风致响应与风振系数的大涡模拟研究

解晓楠, 邱 冶, 王 菲, 危 欣

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京)

摘 要:【目的】柔性光伏支架为风敏感结构,然而目前对其风致振动与风振系数取值的研究还不够充分。【方法】针对三排单跨柔性光伏阵列,基于大涡模拟方法分析了不同风向角和组件倾角下阵列的风荷载与流场特性,探讨了倾角和拉索预拉力对光伏阵列风振响应的影响,提出了风振系数建议值。【结果】在 0° 和 180° 风向角下,阵列首排的整体风压系数绝对值最大,随着倾角的增加,上游组件尾流的干扰效应更加显著;不同倾角工况下,迎风首排支架的竖向位移响应均值最大,但倾角大于 15° 时,下游支架的位移振动幅值更剧烈;随着预拉力的增大,竖向位移均值和标准差均随之降低;通过分析各因素对光伏阵列风振系数的影响,提出了基于各参数的风振系数计算公式。

关键词: 柔性光伏阵列; 大涡模拟; 风荷载; 风振响应; 风振系数

中图分类号: TM615; TU312.1 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20260024 **文章编号:** 1007-9432(2026)04-0870-10

Large-Eddy Simulation on Wind-Induced Responses and Wind Vibration Coefficients of Flexible Photovoltaic Arrays

XIE Xiaonan, QIU Ye, WANG Fei, WEI Xin

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, China)

Abstract: 【Purposes】Flexible photovoltaic (PV) supports are wind-sensitive, yet research on their wind-induced vibrations and wind vibration coefficients remains insufficient. 【Methods】In this study, a three-row, single-span flexible PV array was investigated by using large eddy simulation (LES) to analyze wind loads and flow field characteristics with varying wind directions and panel tilt angles. Furthermore, the effects of tilt angle and cable prestress on the wind-induced dynamic response of the array were examined, and recommended values for the wind vibration coefficient were finally proposed. 【Results】The results indicate that with 0° and 180° wind directions, the first row exhibits the maximum absolute values of overall wind pressure coefficients. As the tilt angle increases, the interference effect from the wake of upstream modules becomes more pronounced. For varying tilt angles, the first-row supports show the largest vertical mean displacement response; however, when the tilt angle exceeds 15° , downstream supports exhibit more severe vibration amplitudes. The vertical

收稿日期: 2026-01-12; 修回日期: 2026-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808194)

第一作者: 解晓楠, 硕士研究生, (E-mail)xiexiaonan1112@163.com

通信作者: 邱冶, 副教授, 主要从事新能源结构抗风研究, (E-mail)qiuyue@hhu.edu.cn

mean displacement and its standard deviation decrease with increasing prestress. By analyzing the influence of various factors on the wind vibration coefficient of the array, a calculation formula incorporating these parameters is proposed.

Keywords: flexible photovoltaic array; large-eddy simulation; wind load; wind-induced vibration response; wind vibration coefficient

柔性光伏支架具有适应复杂地形、空间利用率高、场地适应性强等优点,近年来在光伏发电系统中得到广泛应用。柔性光伏支架本质上是一种预应力拉索体系,属于典型风敏感结构,有必要对其风荷载和风振响应进行研究,提高这类结构的抗风安全性。

早期针对光伏支架结构的研究聚焦于风荷载特性及其影响因素。国内外学者通过风洞试验研究了风向角、组件倾角和阵列布置等参数对光伏组件风荷载特性的影响^[1,2]。相较于风洞试验,有关光伏阵列风压分布的数值模拟研究较少,楼文娟等^[3]和李正农等^[4]采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型对光伏阵列周围流场进行了模拟,确定了各光伏组件的风荷载体型系数;周强等^[5]利用大涡模拟(LES)方法研究了大跨度柔性光伏阵列的极值风荷载及干扰效应,模拟结果与风洞试验具有良好的一致性。LES方法在时间尺度上对非定常湍流直接求解,可以给出较好的平均脉动风荷载信息以及瞬时流场信息,可对光伏阵列风荷载作用机理进行更深入的分析。

近年来,柔性光伏支架结构的风振安全问题逐渐引起重视。部分学者通过风洞试验研究了柔性光伏支架结构的风振特性^[6,7]。此外,也有学者结合脉动风场人工合成法和有限元法对柔性光伏支架进行风振特性分析。蔡元等^[8]利用谐波合成法分析了悬索光伏支架结构的风致响应及其影响参数;郭涛等^[9]和宋慧铭等^[10]采用线性滤波法实现了脉动风速时程模拟,通过动力响应分析给出支架结构的风振系数建议值为1.3~1.8;刘瑞峰等^[11]基于 Davenport 谱和线性滤波法,对不同索系形式光伏支架进行风振响应分析,给出的单排柔性光伏支架风振系数建议值范围为2.6~3.0。我国现行团体标准^[12]推荐的单层索柔性光伏支架风振系数为1.3~1.6,显著低于风洞试验结果^[13]。而我国能源行业标准^[14]和国外设计规范^[15,16]均未给出柔性光伏支架的风振系数推荐值。

尽管现有研究为柔性光伏支架的设计风荷载提供了理论和试验依据,但对柔性光伏支架的风致响应和风振系数的研究有限。现有研究普遍采用

人工合成法模拟脉动风速时程,且引入准定常假定来确定板面风荷载,未考虑特征湍流对结构响应的放大效应。随着高性能计算资源的飞速发展,LES(大涡模拟)方法被运用到光伏阵列的风荷载研究中,能够获得比较接近实际的脉动风荷载信息,有效提高柔性光伏支架结构风致响应的计算精度。

本文基于LES方法,结合缩尺模型风洞试验数据,对三排单跨柔性光伏阵列进行数值模拟,系统分析了常见组件倾角、风向角和拉索预拉力下光伏组件的风荷载特性及支架结构的风振响应,并提出光伏阵列风振系数拟合公式,为支架结构抗风设计提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 大涡模拟

大涡模拟的基本思想是通过滤波函数将湍流分解为大尺度漩涡和小尺度漩涡,对大尺度漩涡进行直接解析,对小尺度漩涡采用亚格子模型进行描述。滤波后的连续性方程和动量方程为:

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

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

式中: x_i 为笛卡尔坐标; $\bar{u}_i$ 和 $\bar{p}$ 分别为滤波后的速度分量和压力; ρ 和 μ 分别为空气密度和运动黏度系数; τ_{ij} 为亚格子尺度应力,其表达式为:

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

式中: $\bar{S}_{ij}$ 为滤波后的应变率张量; μ_t 为亚格子尺度的湍动黏度。本文选用壁面自适应局部涡黏(WALE)亚格子模型^[5]。

1.2 计算域及网格划分

针对三排单跨柔性光伏阵列建立足尺模型,其几何模型和阵列布置如图1(a)(b)所示。选取0°和180°两组最不利风向工况^[6,17],沿0°顺风向将光伏支架依次命名为第1—3排。每排包含7块光伏组件,尺寸为2 278 mm×1 134 mm×35 mm。光伏支架的跨度 L 为16.25 m,旋转中心的离地高度 H 为3.6 m,

排间距为1.5 m。组件倾角范围为 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$,间隔 5° 。

计算域的具体尺寸为 $16B\times 5L\times 5H$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),见图1(c)。其中 B 为光伏阵列的宽度,模型距入口和出口的距离分别为 $5B$ 和 $10B$ 。最大阻塞度为0.3%,满足要求。为提高计算精度,采用六面体结构化网格进行网格划分。考虑到数值模拟准确性和计算成本,经网格无关性分析,最终选取近壁面最小网格高度为 $0.000\ 5B$,网格增长率不超过1.15,满足 $y^+<5$ 要求,总网格数约为850万。

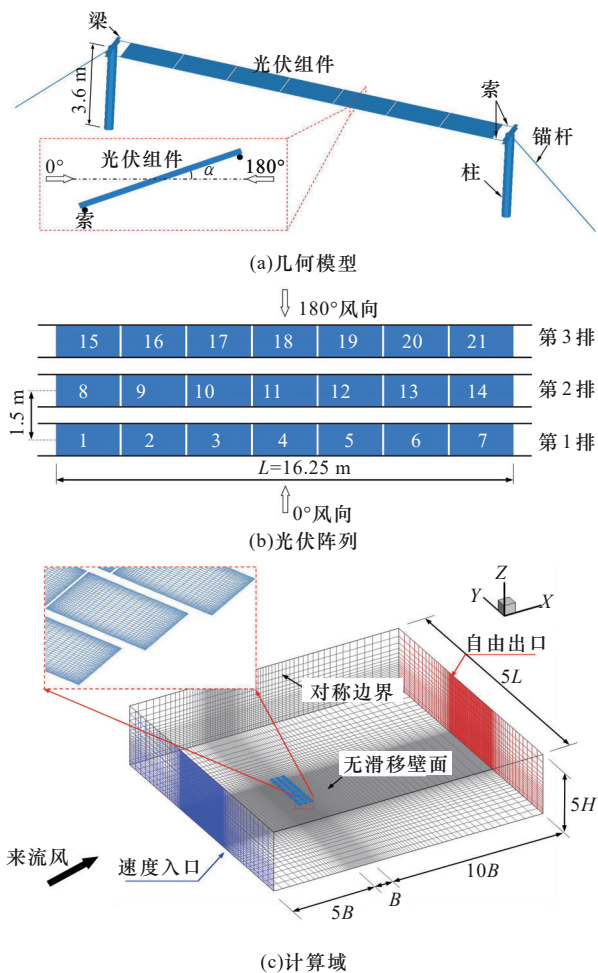


图1 阵列布置及计算域

Fig. 1 Array arrangement and computational domain

1.3 边界条件及求解设置

计算域入口采用速度入口边界,出口采用自由出口;计算域侧面采用对称边界,顶面为自由滑移边界;光伏组件表面及地面均采用无滑移壁面。压力速度耦合方法采用SIMPLEC算法。时间离散采用二阶隐式格式,空间离散采用中心差分格式。所有控制方程相对残差收敛值为 1×10^{-5} 。LES采用 $0.015\ 8\text{ s}$ 时间步长,总计算时长为79 s,其中后47.4 s用于数据统计。

本文基于NSRFG(Narrowband synthesis ran-

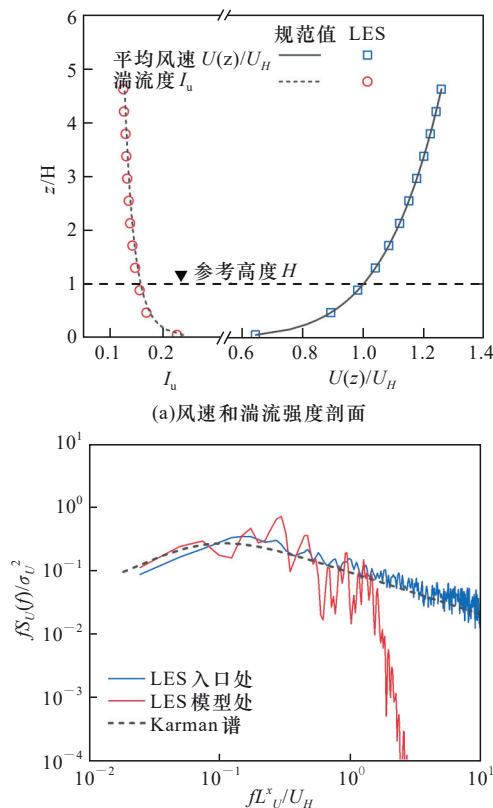
dom flow generation)方法^[18]生成入口湍流风速。该方法利用时间尺度和湍流积分尺度,可较好地满足湍流边界层风场特性的脉动风速场,其表达式如下:

$$u_i(x, t) = \sum_{n=1}^N P_{i,n} \sin(k_{j,n} \cdot x_{j,n} + 2\pi f_n t + \phi_n). \quad (4)$$

$$P_{i,n} = \sqrt{2S_j(f_n)\Delta f}. \quad (5)$$

式中: $u_i(i=1, 2, 3)$ 为三个方向的脉动风速; $x=\{x, y, z\}$ 为三个方向的坐标; f_n 为频率; $k_{j,n}$ 为空间球面的随机坐标向量; S_j 为脉动风速谱; Δf 为频率宽带; ϕ_n 表示服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布随机相位。

依据柔性光伏支架的风环境及地貌特征^[13],本文采用《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012)^[19]规定的B类风场,参考高度取3.6 m,平均风速为30 m/s。空风场的平均风速和湍流度剖面的模拟结果与规范目标值的对比见图2(a),参考高度处脉动风速功率谱与Karman谱的对比见图2(b)。



(b)脉动风速功率谱

图2 B类风场模拟结果

Fig. 2 Simulation results of Class B wind field

1.4 数值模拟准确性验证

为验证数值模拟方法的准确性,以单跨柔性光伏风洞试验模型^[7]为参照对象,利用前述数值模型和入口湍流生成方法进行数值计算。大涡模拟和风洞试验得到的光伏模型中心条带上平均净风压系

数的对比结果见图3(a),两者吻合良好。图3(b)给出了不同组件倾角($\alpha = -30^\circ \sim 30^\circ$)下柔性光伏阵列迎风首排光伏组件的整体风压系数的LES模拟

结果与风洞试验结果对比。由图可知,本文大涡模拟结果与Ma^[2]和杜航^[7]试验数据的总体变化规律一致,其差异主要体现在阵列布置和风场类别的不同。

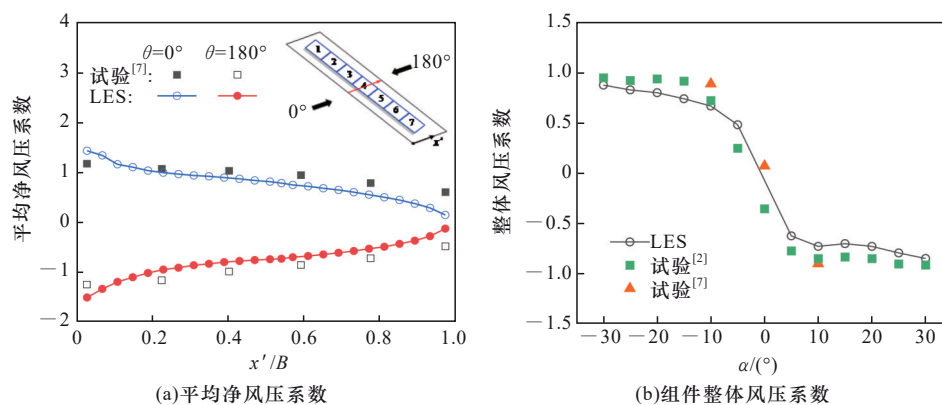


图3 数值模拟与试验结果对比

Fig. 3 Comparison between numerical simulation and experimental results

2 结果分析

2.1 风荷载与流场分析

图4给出了 0° 风向角、三组典型组件倾角($\alpha = 5^\circ, 15^\circ$ 和 30°)工况下光伏阵列表面的平均净风压系数分布云图。分析图4可知, 0° 风向下光伏阵列以

风压力作用为主,且呈现出明显的边缘效应。净风压系数最大值出现在阵列首排光伏组件的迎风前缘处,且随着组件倾角增加,迎风前缘的净风压系数峰值由1.25增大至1.60,设计时应予以考虑。阵列中间排的光伏组件受遮挡效应最显著,当倾角 $\alpha = 30^\circ$ 时,第二排光伏组件所受风载由风压力变为负

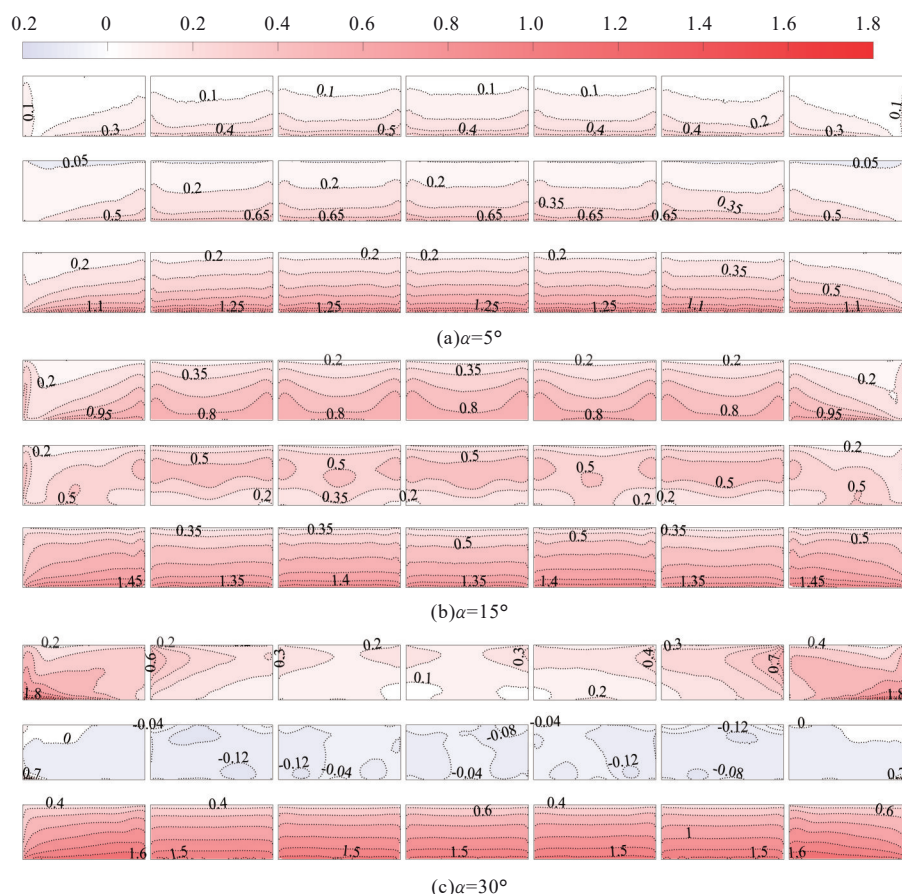


图4 0° 风向下光伏阵列平均净风压系数云图

Fig. 4 Contours of mean net pressure coefficients of PV array with 0° wind direction

风吸力, Xu 等^[1]的光伏阵列数值模拟研究也观察到类似现象。

图 5 为 180°风向角下光伏阵列表面的平均净风压系数等值线图。由图可知,该风向下各组件由负风吸力控制,与 0°风向工况相似,风压系数绝对值最

大值出现在组件最高点的迎风前缘。随组件倾角增加,净风压系数极小值由 -1.2 减小至 -1.6。另外,各排组件表面的风压系数沿顺风向呈现绝对值迅速衰减的梯度变化规律,这会使组件承受力矩作用,应适当加强组件与拉索间的连接措施。

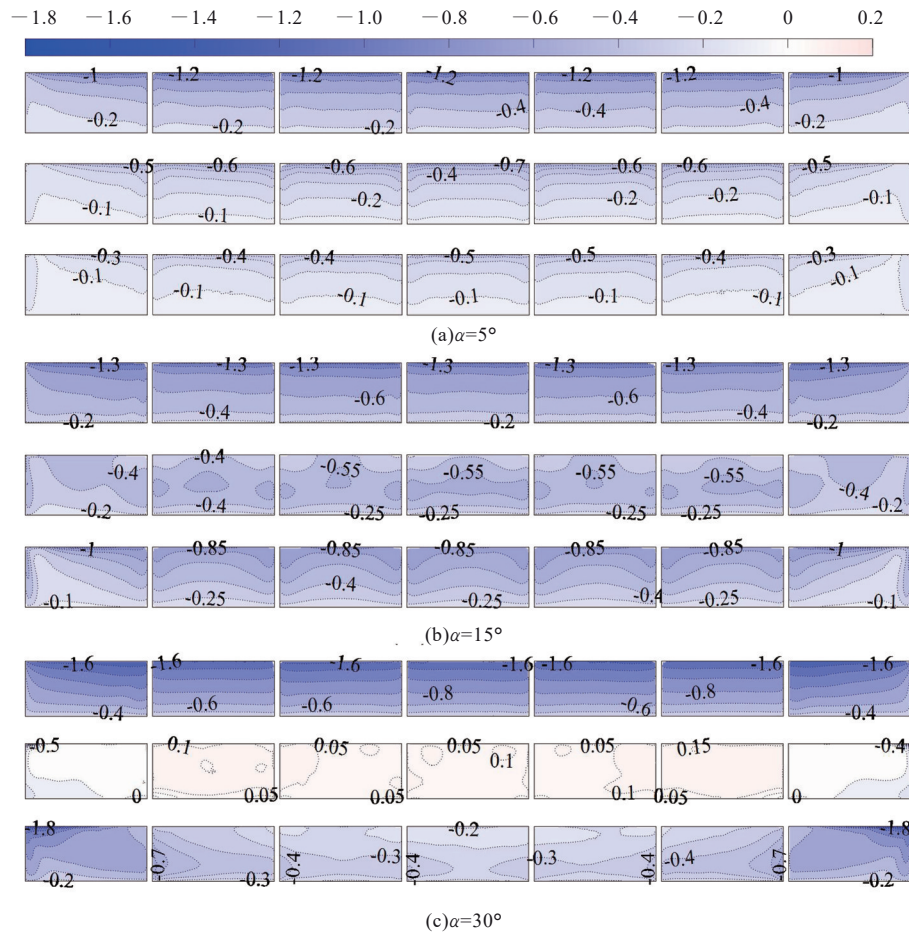


图 5 180°风向下光伏阵列平均净风压系数云图

Fig. 5 Contours of mean net pressure coefficients of PV array with 180° wind direction

为进一步探讨倾角对光伏组件风荷载特性的影响,图 6 给出了 0°和 180°风向下各组件整体风压系数随组件倾角的变化规律。可以看出:1)各排光伏组件的风荷载并非均匀分布,通常跨中组件所受风压力或风吸力最大;2)当 $\alpha=5^\circ$ 和 10° 时,光伏组件的整体风压系数绝对值随着排数增加逐渐减小;3)在大倾角 ($\alpha \geq 15^\circ$) 工况下,处于阵列中间的光伏组件所受整体风压系数绝对值均为最小,且随着倾角增大,下游各排光伏组件沿横风向的风荷载变化逐渐剧烈,易产生扭摆振动。

图 7 给出了三组典型倾角工况下 ($\alpha=5^\circ, 15^\circ$ 和 30°) 阵列跨中 $x-z$ 截面的时均速度流线图及捕捉到的流向漩涡结构。分析图 7 可知:1)当 $\alpha=5^\circ$ 时,光伏组件迎风前缘未见明显气流分离现象,下游的低速区面积较小;2)当 $\alpha=15^\circ$ 时,迎风首排光伏组件前

缘出现明显分离涡,形成较大的低速区,0°风向下中间排光伏组件也出现流向漩涡,而末排光伏组件的低速区面积最小;3)当倾角增大至 30° 时,迎风首排光伏组件的顶部和底部均产生反向漩涡,在下游形成流场结构复杂、面积较大的低速区,这会显著增加第 2 排光伏组件表面的风压脉动。随着排数增加,低速区面积随之减小。

2.2 风致响应分析

2.2.1 有限元模型及验证

采用 ANSYS 建立柔性光伏支架有限元模型,如图 1(a)所示。光伏组件采用 Shell181 单元,弹性模量为 72 GPa;钢拉索与锚索采用 Link10 单元,直径为 15.2 mm,弹性模量为 206 GPa,通过设置初始应变施加初始预拉力,本文考虑钢拉索的预拉力范围为 30~100 kN,间隔 10 kN;端部横梁和立柱采用

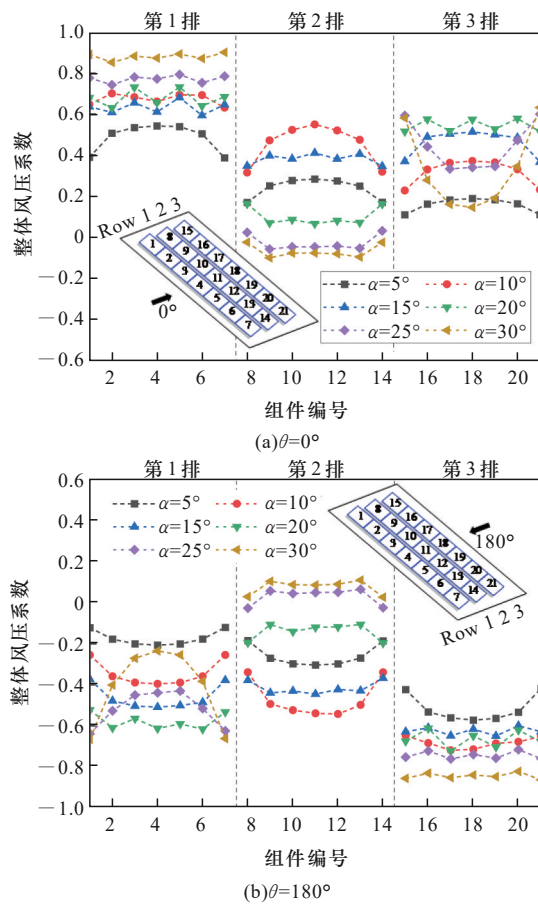


图6 各光伏组件整体风压系数

Fig. 6 Total wind pressure coefficient of each PV module

Beam188单元。基于大涡模拟获取的风压时程数据,采用时域分析法进行结构风振响应计算,时间步长设定为0.0158 s。

图8(a)给出了10°倾角下柔性光伏支架前35阶自振频率随钢索预拉力的变化曲线。由图8(a)可知,结构各阶自振频率随预拉力的提高逐渐增大;前3阶振型分别表现为竖弯、全波竖弯和平动振动,与杜航^[7]有限元分析结果一致。为验证风致响应分析结果的准确性,本文还针对单跨柔性光伏风洞试验模型^[7]进行风振计算,图8(b)分别给出了跨中组件竖向、顺风向位移的均值和标准差,与基于风洞试验数据的响应分析结果最大误差不超过10%,具有较好的模拟精度。

2.2.2 影响参数分析

通过改变倾角和钢索预拉力,对柔性光伏支架结构进行影响参数分析。为便于比较,取阵列跨中光伏组件的竖向位移均值和标准差进行分析,0°和180°风向角下不同组件倾角的计算结果如图9所示。由图9(a)可知,当 $\alpha \leq 10^\circ$ 时,跨中位移均值沿顺风向逐排递减;当倾角超过15°时,在首排遮蔽效应的影响下,中间排组件的竖向位移均值最小。分

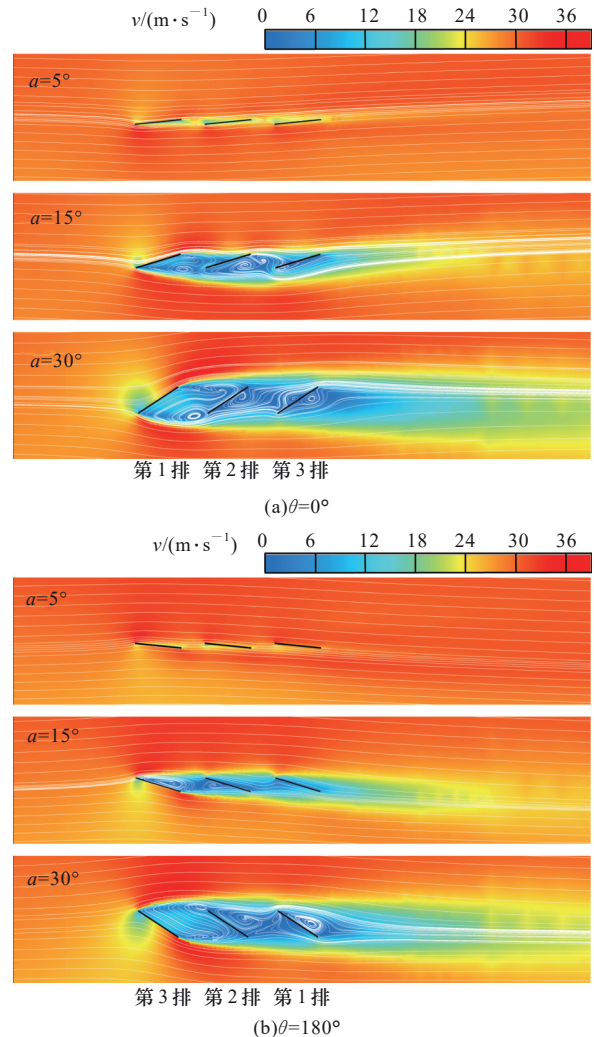


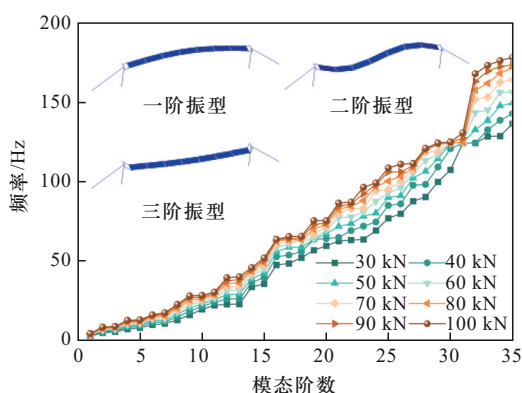
图7 跨中截面时均速度流线图

Fig. 7 Time-averaged wind velocity streamlines at the mid-span section

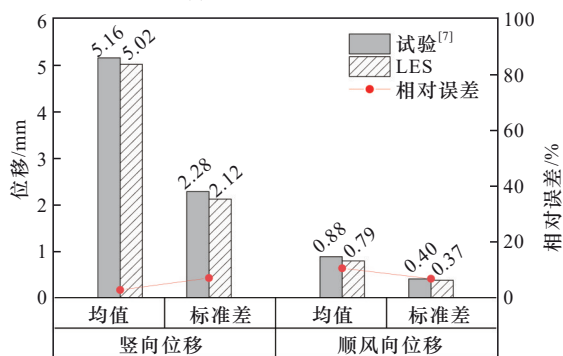
析图9(b)和(c)可知,当 $\alpha=5^\circ$ 和 10° 时,迎风首排光伏组件的跨中位移标准差最大,但是随着倾角增大,阵列间干扰效应逐渐增强,中间排和末排光伏组件的竖向位移响应表现出更强烈的脉动特性。

图10给出了15°倾角下组件竖向位移均值和标准差随预拉力的变化情况。由图可知,随着预拉力的增加,各排组件的位移均值与标准差均呈现单调递减趋势,说明较高的初始预拉力会提高结构刚度以及抵抗风致变形的能力。在低预拉力范围内(30~60 kN),结构刚度对预拉力的变化较为敏感,跨中竖向位移均值和脉动值随预拉力的增加急剧下降;当预拉力超过60 kN后,竖向位移响应的降低趋势相对减缓。

为进一步分析阵列各排组件的响应特征,图11给出了0°和180°风向角、不同倾角下各排组件的跨中竖向位移时程曲线。从图11可以看出,当 $\alpha=5^\circ$ 时,迎风首排竖向位移的波动幅值相对较大,其他



(a) 自振频率及振型



(b) 风振响应验证

图 8 有限元模型验证

Fig. 8 Finite element model validation

排振幅不明显;当倾角增大至 15° 时,在迎风首排尾流湍流的影响下,中间排组件出现大幅竖向振动,振幅显著高于其他两排;在 $\alpha=30^\circ$ 工况下,末排组件竖向位移时程出现大幅波动,且波动幅度明显高于迎风首排和中间排。总体来看,随着倾角增加,振动幅度最大的组件位置逐渐由迎风首排过渡至阵列末排。

3 风振系数

柔性光伏支架结构抗风设计的关键是合理地选取风振系数。本文采用的风振系数定义为脉动风荷载作用下柔性光伏支架的总响应相对平均风响应的比值。考虑到单层索系柔性光伏支架结构刚度小、变形较大,本文选用位移风振系数作为设计指标^[11,13],计算如下:

$$\beta_{zi} = \frac{Y_{si} + Y_{di}}{Y_{si}} = 1 + \frac{\mu\sigma_i}{|Y_{si}|} \quad (6)$$

式中: Y_{si} 和 Y_{di} 分别为 i 节点的平均位移和脉动位移响应; σ_i 为节点位移响应的标准差; μ 为峰值因子,出于安全考虑取 3.5。

柔性光伏阵列各排支架结构风振系数 β_z 随倾角和初始预拉力的变化规律如图 12 所示。图 12 中风振系数(红色圆点)采用了 0° 和 180° 风向角工况的最

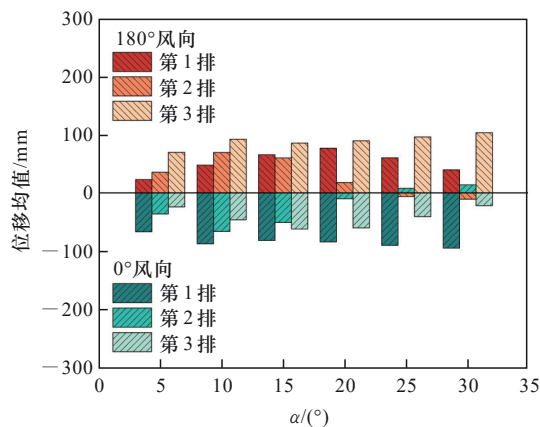
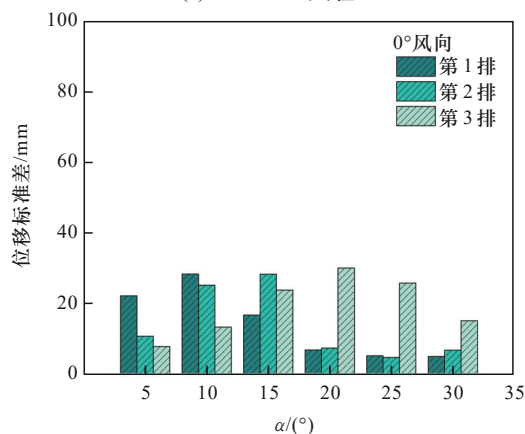
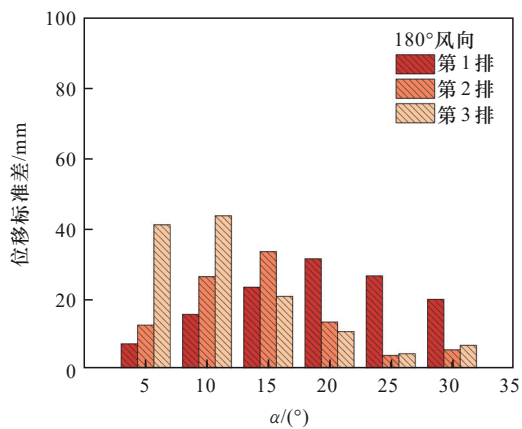
(a) $\theta=0^\circ, 180^\circ$, 均值(b) $\theta=0^\circ$, 标准差(c) $\theta=180^\circ$, 标准差

图 9 跨中位移均值和标准差随倾角变化情况

Fig. 9 Effects of tilt angle on the mean and standard deviation values of mid-span displacement

不利计算结果。从图 12 可以看出,风振系数对倾角变化较为敏感,当倾角超过 10° 时,阵列首排光伏支架的 β_z 随倾角增大呈递增趋势,第 1、3 排 β_z 范围分别为 2.10~2.85 和 2.23~3.22;中间排支架在上游组件尾流的干扰下,风振系数随倾角增加呈现“升高-降低”的变化规律, β_z 范围为 2.25~3.85。在相同倾角工况下,各排支架 β_z 随初始预拉力增加呈单调递增的变化趋势。

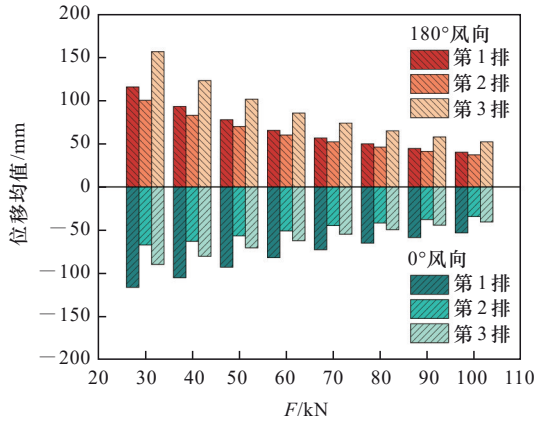
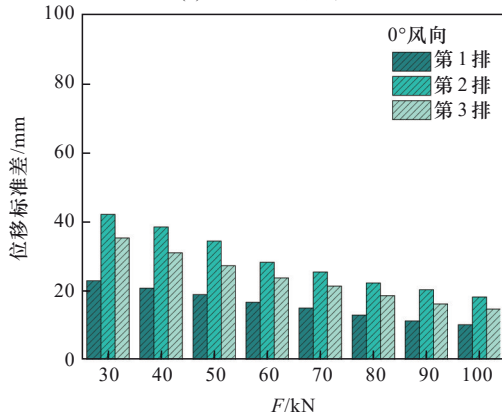
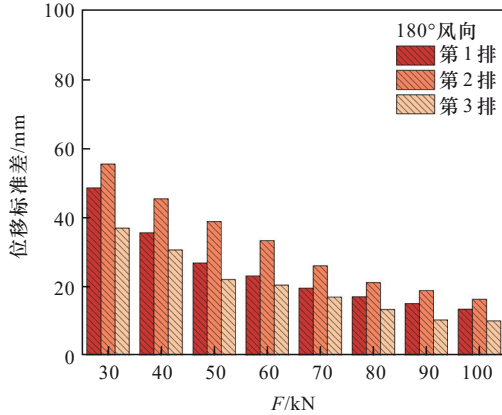
(a) $\theta=0^\circ, 180^\circ$, 均值(b) $\theta=0^\circ$, 标准差(c) $\theta=180^\circ$, 标准差

图10 跨中位移均值和标准差随预应力变化情况

Fig. 10 Effects of prestress on the mean and standard deviation values of mid-span displacement

为便于工程设计,采用非线性回归方法给出了阵列各排支架结构的 β_z 拟合公式,见表1和图12(三维曲面)。其中, α^* 和 F^* 分别表示归一化倾角和初始预拉力,计算如下:

$$\alpha^* = \frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \quad \alpha \in [5^\circ, 30^\circ], \quad (7)$$

$$F^* = \frac{F - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad F \in [30 \text{ kN}, 100 \text{ kN}]. \quad (8)$$

由表1可知,风振系数拟合公式的决定系数

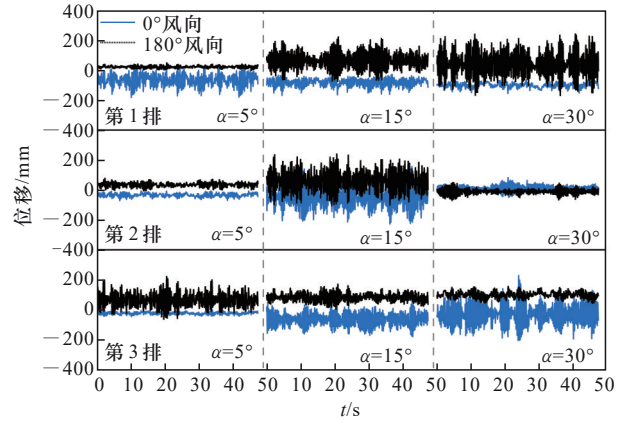
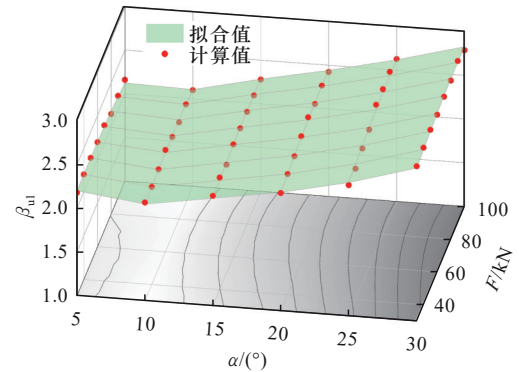
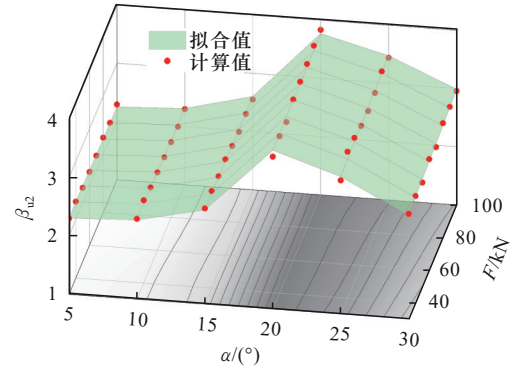


图11 不同倾角下各排组件跨中位移响应时程图

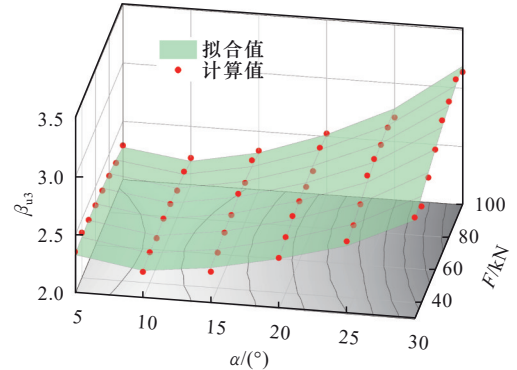
Fig. 11 Time-history of the mid-span displacement response of each row under different tilt angles



(a) 第1排



(b) 第2排



(c) 第3排

图12 风振系数随倾角与预拉力变化规律及其拟合结果

Fig. 12 Variations and fitting results of wind vibration coefficient with tilt angle and prestress

(R^2) 大于 0.98, 均方根误差 (RMSE) 小于 0.052, 具有较好的拟合精度。

我国团体标准《柔性光伏支架结构设计规程》(T/CSEE 0394—2023)^[12] 给出的单层索柔性光伏支架 β_z 推荐范围为 1.3~1.6; 日本 JIS C8955—2017^[15] 规范给出的光伏阵列 β_z 建议值为 2.2, 而美国 ASCE 7—22^[16] 规范规定的单坡结构 β_z 推荐值为

0.92。此外, 王峰等^[13] 基于风洞试验的柔性光伏支架风振系数计算结果表明, 迎风首排和下游支架的风振系数范围分别为 1.50~3.00 和 1.91~4.53, 与本文计算结果较为接近。综上所述, 本文数值模拟和已有试验得到的柔性光伏支架风振系数均超出各国规范推荐值, 现行规范推荐的风振系数不适用于柔性光伏支架体系。

表 1 风振系数拟合结果

Table 1 Fitting results of wind vibration coefficients

排号	位移风振系数拟合公式	R^2	RMSE
1	$\beta_{u1} = -0.9 - 4.4\alpha^* + 26.1\alpha^{*2} + 0.4\alpha^*F^* - 0.3\alpha^{*2}F^* - 14.7\alpha^{*3} - 0.1F^{*3} + 0.8\sin\alpha^* + 3.2\cos\alpha^*$	0.988 4	0.026 3
2	$\beta_{u2} = 75.1 + 3.5\alpha^* - 458.3\alpha^{*2} + 0.3\alpha^{*2}F^* + 309.6\alpha^{*3} + 2.2\sin\alpha^* - 72.8\cos\alpha^*$	0.991 3	0.051 5
3	$\beta_{u3} = 2.3 - 3.2\alpha^* + 4.1\alpha^{*2} + 0.4\alpha^{*2}F^* - 0.4\alpha^{*3} - 0.1F^{*3} + 0.7\sin\alpha^*$	0.984 5	0.035 5

4 结论

本文基于大涡模拟和有限元法对三排单跨柔性光伏阵列进行风振响应分析, 探讨了倾角和初始预拉力对结构风振响应及风振系数取值的影响, 得到如下结论:

1) 组件倾角和风向角对光伏阵列风荷载特性影响显著。0°(180°) 风向角下, 当倾角 $\alpha=5^\circ$ 和 10° 时, 迎风首排光伏组件所受的整体风压力(风吸力) 最大, 其幅值逐排递减; 当倾角 $\alpha \geq 15^\circ$ 时, 中间排组件的整体风力最小, 但受到上游光伏组件尾流的强烈干扰。

2) 支架结构风振响应对组件倾角的变化更敏感。 $\alpha=5^\circ$ 和 10° 时, 迎风首排支架的竖向位移均值和标准差均最大; 当倾角超过 15° 时, 中间及末排支架的振动幅度更剧烈, 应特别注意该工况下阵列下游支架结构的抗风设计。拉索预拉力对支架抗风性能的影响不容忽视, 提高预拉力可有效降低结构的竖向位移响应。

3) 根据竖向位移响应指标计算得到不同工况下的风振系数。阵列前缘和中间排的风振系数取值范围分别为 2.10~3.22 与 2.25~3.85, 均超过各国规范的建议值, 现行规范推荐的风振系数不适用于柔性光伏阵列。

参考文献:

- [1] Xu A, Ma W Y, Yuan H X, et al. The effects of row spacing and ground clearance on the wind load of photovoltaic (PV) arrays [J]. Renewable Energy, 2024, 220: 119627.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 李正农, 胡存云, 吴红华, 等. 基于超级计算的大规模跟踪式光伏发电阵列风压分布研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(6): 242-251.
- [5] 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.
- [6] Liu J Q, Li S Y, Luo J, et al. Experimental study on critical wind velocity of a 33-meter-span flexible photovoltaic support structure and its mitigation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 236: 105355.
- [7] 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.
- [8] 蔡元, 邓华, 李本悦. 悬索光伏支架结构抗风设计方法初探 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(21): 69-77.
- [9] 郭涛, 杨渊茗, 黄国强, 等. 山区峡谷地形下柔性支撑光伏阵列的风振特性研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 131-140.
- [10] 宋蕊铭, 袁焕鑫, 杜新喜, 等. 单层索系柔性光伏支架结构静力与动力响应研究 [J]. 建筑结构, 2025, 55(11): 24-30.
- [11] 刘瑞峰, 陈静, 王子庠, 等. 大跨度柔性光伏支架风振响应分析及风振系数取值研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(S1): 41-49.
- [12] 柔性光伏支架结构设计规程: T/CSEE 0394—2023 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2024.
- [13] 王峰, 邹卓易, 李森, 等. 柔性光伏支架风干扰效应及风振系数研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2026, 66(3): 563-576.

-
- [14] 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.
- [15] Load design guide on structures for photovoltaic array:JISC 8955—2017[S]. Tokyo:Japanese Standards Association,2017.
- [16] ASCE/SEI 7—22. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures[S]. Newyork:American Society of Civil Engineers,2022.
- [17] Xu H W, Ding K Y, Shen G H, et al. Experimental investigation on wind-induced vibration of photovoltaic modules supported by suspension cables[J]. Engineering Structures,2024,299:117125.
- [18] Yu Y L, Yang Y, Xie Z N. A new inflow turbulence generator for large eddy simulation evaluation of wind effects on a standard high-rise building[J]. Building and Environment,2018,138:300-313.
- [19] GB 50009—2012. 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

(编辑:贾丽红)