

文章编号:1673-9469(2024)02-0016-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.003

# 大跨度光伏跟踪支架结构风振响应特性研究

陈雪辉<sup>1,2</sup>, 张一凡<sup>1,2\*</sup>, 李昊<sup>1,2</sup>, 马涛<sup>2,3</sup>, 李威<sup>2,3</sup>, 高婷<sup>1,2</sup>

(1. 安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽合肥 230601; 2. 高端装备关键摩擦副安徽省重点实验室, 安徽合肥 230601; 3. 合肥波林新材料股份有限公司, 安徽合肥 230601)

**摘要:** 为研究大跨度光伏跟踪支架的风振响应特性,以某平单轴跟踪式光伏支架为研究对象,分析其动力学特性,采用谐波叠加法模拟脉动风速时程,通过时程分析方法对支架进行风振响应研究并考察平均风速、光伏板倾角以及风向角对光伏跟踪支架结构风振响应的影响。研究结果表明:光伏跟踪支架自振频率较低且分布集中;所有支撑组件中,檩条风致位移响应最大,主梁和立柱位移响应较小;檩条顺风向长度上位移响应具有不对称性,主梁横风向长度上位移响应与自身结构对称性一致;结构风致位移响应随着平均风速、光伏板倾角、风向角的增大而增大;负向风荷载作用下,光伏跟踪支架风振响应更剧烈,光伏板倾角从 $25^\circ$ 增大到 $35^\circ$ 时,支架的刚度会迅速降低,横向脉动风对主梁和立柱的位移响应影响很大。

**关键词:** 光伏跟踪支架;脉动风;风振响应;风荷载

中图分类号:TM615

文献标识码:A

## Research on Wind Vibration Response Characteristics of Large Span Photovoltaic Tracking Support Structure

CHEN Xuehui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yifan<sup>1,2\*</sup>, LI Hao<sup>1,2</sup>, MA Tao<sup>2,3</sup>, LI Wei<sup>2,3</sup>,  
GAO Ting<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;  
2. Anhui Province Key Laboratory of Critical Friction Pair for Advanced Equipment, Hefei, Anhui 230601, China;  
3. Hefei Bolin Advanced Materials Company Limited, Hefei, Anhui 230601, China)

**Abstract:** To study the wind-induced vibration response characteristics of large-span photovoltaic tracking brackets, a flat single axis tracking photovoltaic bracket was taken as the research object, and its dynamic characteristics were analyzed. The harmonic superposition method was used to simulate the fluctuating wind speed time history. The wind-induced vibration response of the bracket was studied using the time history analysis method, and the effects of the average wind speed, photovoltaic panel inclination angle, and wind direction angle on the wind-induced vibration response of the photovoltaic tracking bracket structure were investigated. The results indicate that the natural frequency of photovoltaic tracking brackets is low and distributed centrally. Among all supporting components, the wind induced displacement response of purlins is the highest, while the displacement response of main beams and columns is relatively small. The displacement response of purlins along the windward direction has asymmetry, while the displacement response of the main beam along the windward direction is consistent with the symmetry of its own structure. The wind-induced displacement response of the structure increases with the increase of average wind speed, photovoltaic panel inclination angle, and wind direction an-

收稿日期:2023-07-07

基金项目:安徽省高校杰出青年科研项目(2022AH020025);安徽省高等学校自然科学重点研究项目(2022AH050257);国家开发投资集团有限公司科技项目(sdic2023-03);合肥市自然科学基金资助项目(202317);安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2022-YF056)

作者简介:陈雪辉(1977-),男,江苏邳州人,博士,教授,主要研究方向:机械工程动力装备分析计算、精密特种加工技术分析。

\*通信作者:张一凡(1999-),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向:光伏支架风振特性分析。

gle. Under negative wind loads, the wind vibration response of photovoltaic tracking brackets is more severe. When the inclination angle of the photovoltaic panel increases from  $25^\circ$  to  $35^\circ$ , the stiffness of the bracket will rapidly decrease. The lateral pulsating wind has a significant impact on the displacement response of the main beam and columns.

**Key words:** photovoltaic tracking bracket; pulsating wind; wind vibration response; wind load

在能源匮乏,环境污染严重的 21 世纪,太阳能作为一种高质量的新型能源,已经得到世界各国的高度重视<sup>[1]</sup>。光伏发电能高效利用太阳能且环保性好,因此得到广泛的发展<sup>[2]</sup>。在一些大型光伏电站中,光伏支架的支撑跨度需达到十余米甚至数十米,结构刚度较低,在风荷载作用下易发生变形破坏,因此光伏支架的风振响应和抗风问题研究非常重要。

目前,关于光伏板风荷载以及结构的风振响应研究,学者主要通过数值模拟和风洞实验来确定。马文勇等<sup>[3-4]</sup>利用刚性模型进行了风洞实验,探究了不同参数对光伏组件风荷载的影响,并提出风荷载计算公式和取值模型。张超等<sup>[5]</sup>运用流固耦合算法,考察了光伏支撑系统在脉动风下的风振时程。蔡元等<sup>[6]</sup>构建了悬索光伏支架的向量式有限元计算模型,对结构的风致位移和内力响应特性进行分析后发现,其幅值响应主要受瞬时风速的准静力效应驱动,共振效应影响较小。王泽国等<sup>[7]</sup>对比了考虑和不考虑脉动风空间相关性对多排多跨柔性光伏支架风致振动响应的影响。麻玉山等<sup>[8]</sup>采用强度折减法,详细分析了塔基边坡在不同风速下的变形情况。He 等<sup>[9]</sup>通过风洞实验模拟了一类电缆支撑光伏组件的风致振动,详细研究了响应特征,并根据响应特征提出了抑制措施。Liu 等<sup>[10]</sup>采用基于弹性试验模型的风洞试验,研究了跨度为 33 m 的柔性光伏组件支撑结构的风致响应和临界风速,并详细考察了三种稳定索对提高柔性光伏组件支撑结构临界风速的效果。

综上所述,学者主要针对光伏板表面风压变化规律和柔性光伏支架的风振响应进行分析,对于大跨度刚性光伏跟踪支架抗风性能的研究较少,且没有考虑光伏支架各支撑组件在脉动风空间相关性作用下的振动响应。在实际工程应用中,不同形状规格的支撑组件对光伏跟踪支架的刚度有很大影响,此外,光伏跟踪支架在工作时光伏板倾角会随太阳光入射角度的改变而不断变化,因此风振响应研究需考虑光伏板倾角的变化<sup>[11]</sup>。

本文对大跨度刚性光伏跟踪支架整体结构建模,采用 Davenport 风谱,引入脉动风空间相关函数,通过谐波叠加法模拟脉动风速时程,并将其转换为风荷载时程信号;然后对光伏跟踪支架的模态振型进行分析,并完成了脉动风荷载作用下支架的风振响应计算;最后考察平均风速、光伏板倾角、风向角等参数对结构风致响应的影响,为大跨度光伏跟踪支架的风致振动和抗风设计提供参考。

## 1 光伏跟踪支架系统及有限元模型

### 1.1 工程概述

本文以甘肃省敦煌市东部光电园区内国投敦煌 40 MW 光伏发电项目为背景工程。电站介于东经  $92^\circ 13'$  至  $95^\circ 30'$ ,北纬  $39^\circ 40'$  至  $41^\circ 40'$  之间,25 年一遇基本风压为  $0.43 \text{ kN/m}^2$ ,拥有 52 组平单轴光伏跟踪支架,每个组件串由 26 块  $2\ 261 \text{ mm} \times 1\ 134 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$  单块光伏板组成,单排支架由两个组件串构成,共 2 行 26 列排布,电池板竖向布置。支架由上往下分别由檩条、加强筋、主梁、立柱组成,各构件采用冷弯薄壁型钢制作,热镀浸锌处理。组件最低点距地 0.6 m,立柱之间设置通长方管主梁,主梁两侧设置次檩条,通过抱箍和斜撑与主梁连接。调节构件通过连接杆件与主梁连接。组件与次檩通过压块或螺栓进行连接,安装螺栓采用双螺母防松动。

### 1.2 有限元模型

对平单轴光伏跟踪支架模型进行以下简化:去除螺栓、螺栓孔、抱箍等非重要零部件和细微特征;由于光伏板边缘的框架保护壳在整块光伏板中质量占比很小,将其省略;忽略 26 块单块光伏板之间的间隙,用整块光伏面板代替建模。光伏面板与檩条之间采用绑定约束,所有支撑组件合并为一个整体,立柱底端设置固定约束。光伏板倾角  $\alpha$  为  $45^\circ$  的光伏跟踪支架有限元模型及风向角  $\theta$  如图 1 所示。

本文研究的光伏跟踪支架几何组成部分包括光伏面板和支撑组件。每个光伏面板由 2 行 13 列

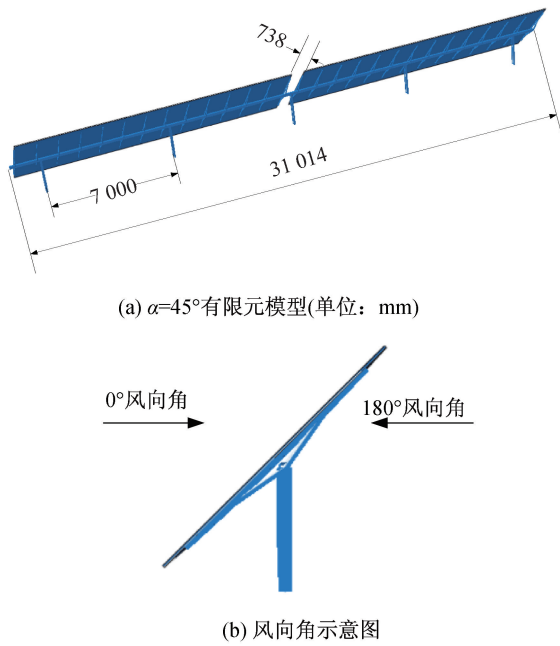


图1 光伏跟踪支架有限元模型及风向角示意图

Fig. 1 Finite element model of PV tracking bracket and schematic diagram of wind angle

26块光伏板组成,单块光伏板尺寸为2 261 mm×1 134 mm×35 mm,组件间距为20 mm,整体共两块光伏面板,间距为738 mm。支撑组件包括檩条、加强筋、主梁和立柱。光伏板材料为钢化玻璃,密度为2 500 kg/m<sup>3</sup>、弹性模量为72 GPa、泊松比为0.2;支撑组件材料为Q355钢,密度为7 850 kg/m<sup>3</sup>、弹性模量为210 GPa、泊松比为0.3。

采用Abaqus中的梁单元与壳单元进行建模。光伏板采用壳单元,截面长度、宽度和厚度按照实际尺寸定义;檩条、加强筋、主梁和立柱采用梁单元,截面形状尺寸按照图2定义。其中檩条、加强筋和立柱均为开口截面,选择B310S两节点开放截面空间梁单元,主梁为封闭截面,选择B31两节点空间线性梁单元。所有梁单元需按照实际情况指定梁的方向,光伏跟踪支架结构有限元分析计算模型共包括77 026个单元。

## 2 脉动风荷载模拟

自然界观测的风包含长周期和短周期两种成分。周期超过10 min的风为平均风,对结构产生静力作用,周期只有几秒钟的风为脉动风,会引起结构的动力响应<sup>[12]</sup>。研究中将脉动风看成一种零均值平稳高斯随机过程,采用Davenport谱模拟风速时程,其表达式为

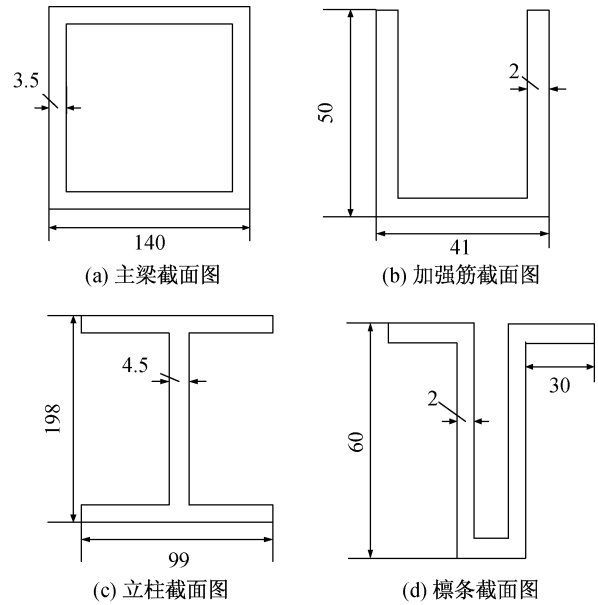


图2 光伏支撑组件截面图(单位:mm)

Fig. 2 Cross-section of PV support module (unit:mm)

$$S(f) = 4k\bar{v}_{10}^{-2} \frac{x}{f(1+x^2)^{4/3}}, x = \frac{1200f}{\bar{v}_{10}} \quad (1)$$

式中, $\bar{v}_{10}$ 为10 m高度处的平均风速; $f$ 为频率; $k$ 为地面粗糙度系数。

脉动风具有空间相关性,由于光伏跟踪支架竖向尺度较小,但其横向跨度却很大,因此本文只考虑宽度方向上的相关性,其相关函数表达式为

$$\text{coh}_{ij} = \exp\left[\frac{-fC|x_i - x_j|}{\bar{v}}\right] \quad (2)$$

式中, $\bar{v}$ 为平均风速,通常光伏跟踪支架安装高度距地面只有数米,取 $\bar{v} = \bar{v}_{10}$ ;  $C$ 为衰减系数,取10。

采用Matlab编制光伏跟踪支架脉动风场程序。通过谐波叠加法模拟脉动风速时程,并采用快速傅里叶变换技术提高计算效率。令每一列光伏板的中心点为一个风速模拟点,取设计基本风速 $\bar{v}_{10} = 25$  m/s,模拟空间6 000个点,总时间60 s,时间增量0.01 s,频率增量0.001 Hz,频率区间0.001~6 Hz,地面粗糙度系数 $k$ 取0.001 5。图3为生成的某点脉动风速时程图及其脉动风功率谱与Davenport谱的对比图。从图中可以看出,脉动风时程基本符合零均值,模拟得到的功率谱函数与目标谱函数吻合程度较高,因此认为模拟的风速可以在一定程度上反映自然风场的特性<sup>[13]</sup>。

光伏跟踪支架所受的风压应为平均风压与脉动风压之和,在不考虑风与结构之间的耦合作用时,计算公式为

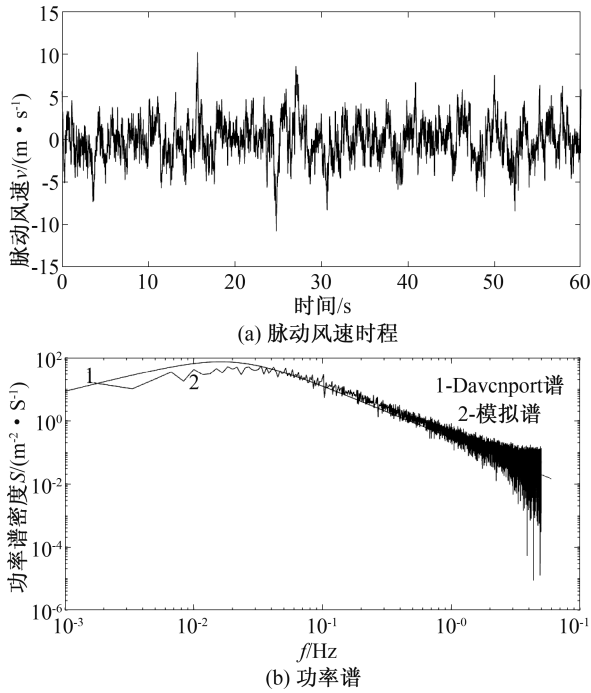


图 3 模拟脉动风速

Fig. 3 Simulated fluctuating wind speed

$$P_i(t) = \frac{1}{2} \rho [\bar{v}_i + v_i(t)]^2 \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为空气密度, 取  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ;  $\bar{v}_i$  为  $i$  点的平均风速;  $v_i(t)$  为  $i$  点在  $t$  时刻的脉动风速。

由于光伏跟踪支架支撑组件的横截面积远小于光伏板面积, 忽略作用在支撑组件上的风荷载。光伏跟踪支架所受的风荷载为

$$F_i(t) = A \times P_i(t) \times \mu_s \quad (4)$$

式中,  $A$  为光伏板面积, 为  $133.33 \text{ mm}^2$ ;  $\mu_s$  为体型系数, 参考《光伏支架结构设计规程》(NB/T 10115—2018)<sup>[14]</sup> 取值, 如图 4 所示。



$\alpha$	$\leq 15^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$55^\circ$
$\mu_{s1}$	0.80	0.85	1.00	1.30	1.30
$\mu_{s2}$	-0.95	-1.00	-1.30	-1.60	-1.60

注: 其余中间角度按线性插值法计算。

图 4 光伏板风荷载体型系数

Fig. 4 Wind load shape coefficient of photovoltaic panels

将平均风速和模拟得到的脉动风速代入风荷载计算公式, 分别对每个模拟点施加集中风荷载, 与光伏板表面进行耦合约束, 在  $\bar{v}_{10} = 25 \text{ m/s}$  时, 其

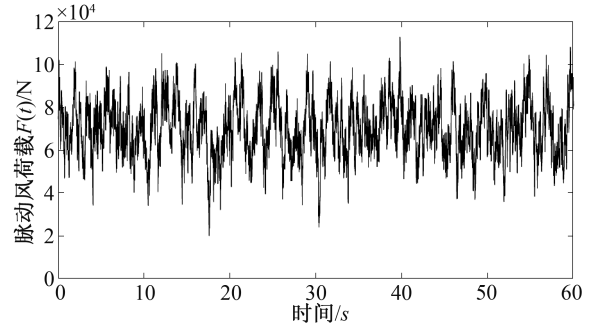


图 5 总风荷载时程

Fig. 5 Time history of total wind load

风荷载时程如图 5 所示。

### 3 风振响应分析

#### 3.1 模态分析

为研究光伏跟踪支架的风振响应, 需先对其进行模态分析, 了解支架各阶模态的频率以及振动特性。结构的运动方程基本公式为

$$[M] \{a(t)\} + [C] \{v(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (5)$$

式中,  $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\{a(t)\}$ 、 $\{v(t)\}$ 、 $\{x(t)\}$  分别为节点加速度向量、速度向量、位移向量;  $\{F(t)\}$  为节点变荷载向量。

模态分析不考虑结构的阻尼以及外荷载, 因此运动方程为

$$[M] \{a(t)\} + [K] \{x(t)\} = 0 \quad (6)$$

当结构做简谐运动时, 位移和加速度为

$$\{a(t)\} = -\omega^2 \{\varphi\} \cos \omega t \quad (7)$$

$$\{x(t)\} = \{\varphi\} \cos \omega t \quad (8)$$

代入式(6)可得:

$$[K] - \omega_i^2 [M] = 0 \quad (9)$$

式中,  $\omega_i$  为角频率, 对应的特征向量  $\{x_i\}$  即为所求的振型。

光伏跟踪支架模态分析的前 6 阶频率、周期以及主要振型分别如表 1 和图 6 所示。

表 1 光伏跟踪支架前 6 阶自振频率及周期

Tab. 1 First 6 natural frequencies and periods of the PV tracking bracket

阶数	频率/Hz	周期/s
1	1.250 6	0.799 6
2	1.337 6	0.747 6
3	1.405 7	0.711 4
4	2.114 3	0.473 2
5	2.252 4	0.443 9
6	2.406 5	0.415 5



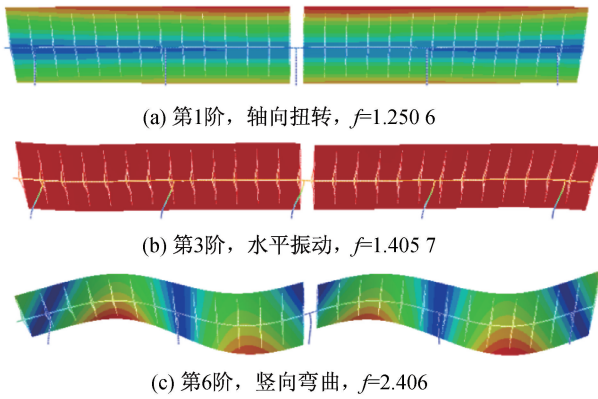


图6 光伏跟踪支架主要振型及频率

Fig. 6 Main vibration modes and frequencies of photovoltaic tracking brackets

从上述信息中可以看出,光伏跟踪支架的自振频率较低、周期较短,且频率值没有明显的突变,分布较为集中,表明结构的动力特性复杂,风对结构的振动响应影响较大。因此,研究光伏跟踪支架的风振响应具有相当重要的意义。

### 3.2 风振响应分析

研究光伏跟踪支架的风振响应,应重点关注其支撑组件在脉动风荷载作用下的振动位移和加速度。在  $\bar{v}_{10} = 25 \text{ m/s}$  的  $0^\circ$  风向角下,光伏跟踪支架各支撑组件位移和加速度均方根(RMS)值最大点的时程曲线如图7所示。

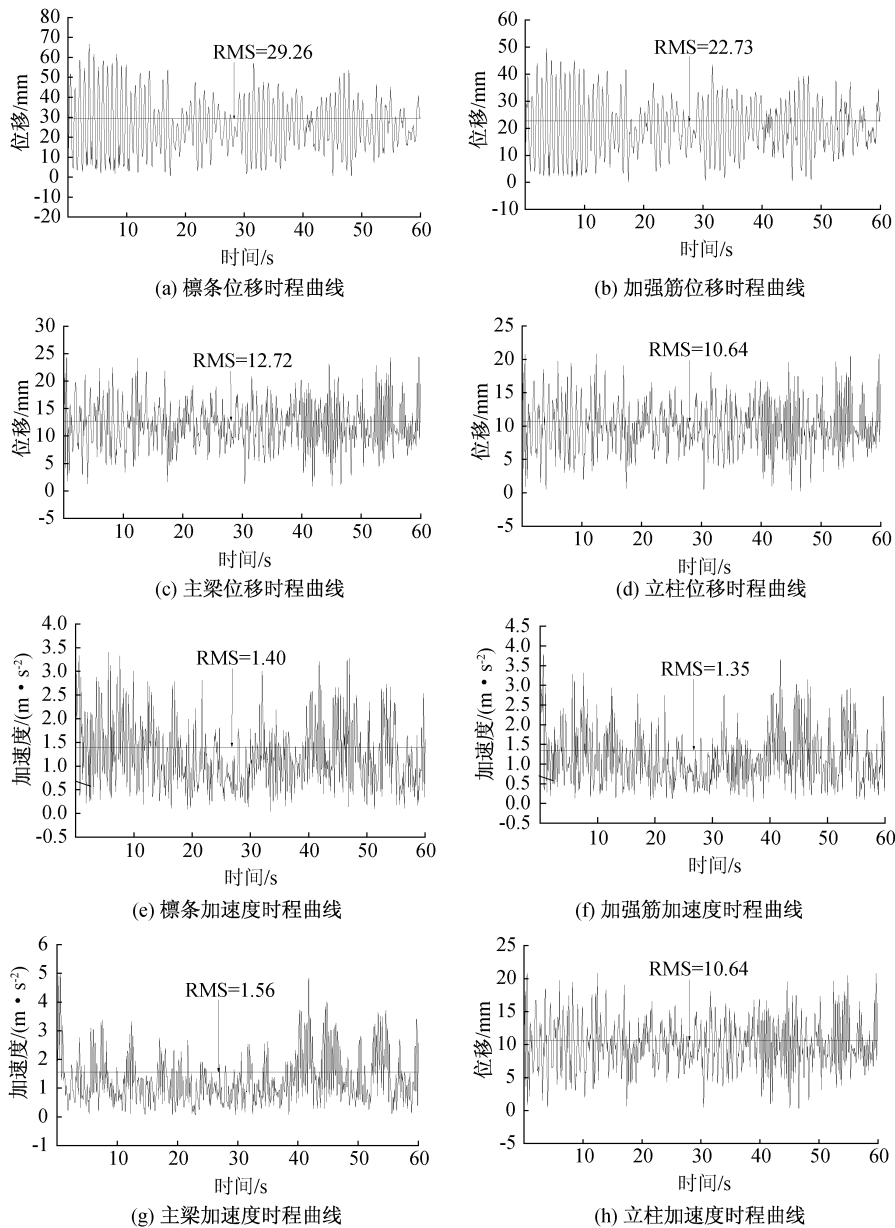


图7 光伏跟踪支架各支撑组件位移和加速度时程曲线对比

Fig. 7 Comparison of displacement and acceleration time history curves of various support components of photovoltaic tracking brackets

从图中可以看出,檩条的位移响应最大,其位移均方根值为 29.26 mm,最大瞬时位移量达到 66.65 mm。加强筋位移响应也较大,且和檩条在前 10 s 的振动响应更为剧烈。檩条和加强筋通过螺栓连接,绕着主梁带动光伏板转动,因此作用在光伏板上的风荷载会直接引起其振动响应,故位移量均比较大。相比之下,主梁和立柱的位移均方根都比较小,其值分别为 12.72 mm 及 10.64 mm。主梁跨度大,但位移却很小,表明结构刚度大,也有可能是此分析情况下光伏板倾角较大,抵挡了大部分的风荷载。对于加速度响应,各支撑组件之间相差不大,在脉动风荷载作用下的前 3 s 振动幅度非常剧烈,这是因为结构受到突击载荷冲击的影响。在 20~30 s 之间,所有支撑组件加速度响应趋于平稳,随后又发生较大的波动。

为进一步研究脉动风荷载对光伏跟踪支架的动力响应,取最主要支撑组件且跨度大的檩条和主梁,分析沿其长度方向不同点的位移响应。檩条顺风向长度和主梁横风向长度上的位移响应均方根变化如图 8 所示。

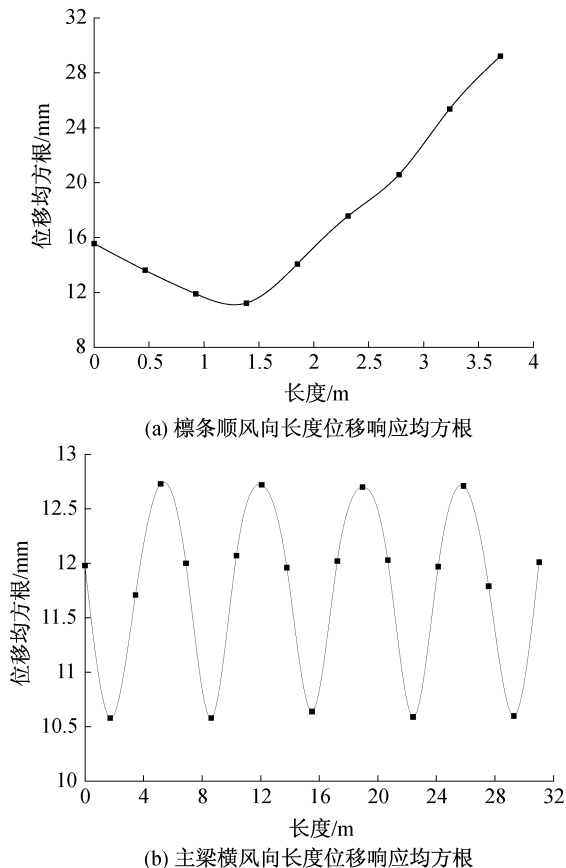


图 8 檩条及主梁位移响应均方根随长度变化曲线  
Fig. 8 Variation curves of root mean square of purlin and main beam displacement response with length

由图 8 可知,檩条顺风向长度上的位移响应均方根先减小后增大,大约在 1/3 处达到最小值。曲线整体呈线性变化,但位移响应的增加速率远大于减小速率,可能是因为檩条支撑着光伏板,与其倾斜角度相同,在上部分所受风荷载的弯矩较大。主梁横风向长度上的位移响应均方根呈波浪式变化且与自身结构对称性一致。对整体结构分析,主梁由 5 根立柱支撑,相邻两根立柱之间主梁位移响应先增大后减小,符合简支梁的受力特性。相比于檩条,主梁跨度大但位移响应小,由此可以看出,立柱很大程度上提高了主梁的刚度。

## 4 影响支架风振响应的参数分析

### 4.1 风速的影响

在光伏板倾角  $\alpha$  保持  $45^\circ$  不变的情况下,施加具有不同平均风速的正向和负向风荷载于结构上。光伏跟踪支架各支撑组件的位移响应均方根如表 2 所示。由其可知,随着平均风速的增大,所有支撑组件的位移响应均增大。在相同风速下,负向风荷载引起的结构响应大于正向风荷载,这是因为负向风荷载的体型系数  $\mu_s$  更大,因此相同平均风速下,光伏跟踪支架所受的脉动风荷载比正向风大。分析发现,结构在负向平均风速 25 m/s 时比正向平均风速 30 m/s 时所受的风荷载还大,但各支撑组件的位移响应反而小,这表明光伏跟踪支架的风振响应不仅与风荷载的大小有关,还与风荷载与结构自身质量的结合方式有关。负向风与结构自身质量方向相反,因此一部分风荷载用于克服自身重力产生的位移。

表 2 不同平均风速下各支撑组件的位移响应均方根

Tab. 2 Root mean square displacement response of each support component under different average wind speed

$\bar{v}_{10}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	檩条/ mm	加强筋/ mm	主梁/ mm	立柱/ mm
+20	17.64	13.89	8.00	6.68
+25	29.26	22.73	12.72	10.64
+30	40.37	31.63	18.11	15.15
-20	21.98	17.27	9.91	8.27
-25	35.59	27.70	15.52	12.98
-30	49.53	38.86	22.33	18.66

### 4.2 光伏板倾角的影响

跟踪式光伏相对于固定式光伏具有能够随太阳光的入射角度改变自身光伏板倾角的能力,以此尽可能地使太阳光垂直于光伏组件,达到最大

利用效率。光伏板倾角不同,支架的刚度和质量分布也有差别,在平均风速  $\bar{v}_{10} = 25 \text{ m/s}$  的正向风荷载下,光伏板倾角  $\alpha$  从  $15^\circ$  逐渐增加到  $45^\circ$  时,各支撑组件的位移响应均方根如表 3 所示。由其可知,随着光伏板倾角的增大,各支撑组件位移响应均增大。这是因为倾角的增大会使体型系数  $\mu_s$  增大,因此脉动风荷载也更大,同时风荷载方向与  $y$  轴的夹角也会增大,导致顺风向的分量更大。当  $\alpha \leq 25^\circ$  时,风荷载的大小变化起主导作用,各组件位移响应增加量相对较小;当  $\alpha$  由  $25^\circ$  增大到  $35^\circ$  时,支撑组件的位移响应迅速增大,相对增加量达 95% 左右,此时风荷载的大小和方向对光伏跟踪支架的风振响应影响均很大;当  $\alpha$  继续增大时,风荷载的方向变化起主导作用,相对增加量降低至 50% 左右,但比  $\alpha \leq 25^\circ$  时要大。

表 3 不同光伏板倾角下各支撑组件的位移响应均方根  
Tab. 3 Root mean square of displacement response of each support module under different inclination angles of PV panels

$\alpha/(\circ)$	檩条/ mm	加强筋/ mm	主梁/ mm	立柱/ mm
15	6.70	5.31	3.29	2.40
25	9.82	7.79	4.78	3.63
35	19.17	15.09	8.94	7.84
45	29.26	22.73	12.72	10.64

#### 4.3 风向角的影响

风向角的变化会影响支架所受风荷载的作用方向,改变其受力特性和效果,从而对支架的振动响应产生影响。在光伏板倾角  $\alpha$  为  $45^\circ$ ,平均风速  $\bar{v}_{10} = 25 \text{ m/s}$  的正向风荷载作用下,各支撑组件的位移响应均方根随风向角  $\theta$  的变化情况如表 4 所示。由其可知,风向角增大会导致支撑组件振动响应增大,这表明横向脉动风的作用对光伏跟踪支架的风振响应有很大影响。其中主梁和立柱的

表 4 不同风向角下各支撑组件的位移响应均方根  
Tab. 4 Root mean square of displacement response of each support component at different wind angles

$\theta/(\circ)$	檩条/ mm	加强筋/ mm	主梁/ mm	立柱/ mm
0	29.26	22.73	12.72	10.64
15	34.19	29.22	20.20	19.02
30	40.01	38.94	31.61	31.39
45	56.57	55.06	44.70	44.39
60	66.14	65.49	54.00	53.85

位移响应受风向角变化影响最大,在风向角  $\theta$  为  $60^\circ$  下的位移响应均方根值比  $0^\circ$  下增大了三至四倍。这种情况是因为檩条对横风向脉动风造成的振动能量吸收能力不强,使得主梁和立柱承受了过多的振动,结构刚度明显降低。

## 5 结论

1) 所有支撑组件中檩条位移响应最大,材料韧性较高,能吸收一部分顺风向的振动能量,避免主梁和立柱产生过多的振动。可增大檩条的厚度使其在不改变性能情况下拥有更强的刚度;在满足强度条件下可适当减小主梁和立柱的截面尺寸或减少立柱数量。

2) 檩条风致位移响应在其长度方向上具有不对称性,顶点处位移响应最大;主梁横风向长度上的位移响应均方根呈波浪式变化且与自身结构对称性一致。

3) 结构风致位移响应随着平均风速、光伏板倾角、风向角的增大而增大。风荷载与结构自身质量方向相反时会抵消一部分振动;光伏板倾角从  $25^\circ$  增大到  $35^\circ$  时,支架的刚度会迅速降低,在遇到风荷载较大的情况下应将光伏板倾角调至水平附近;横风向脉动风对主梁和立柱的位移响应影响很大,可在光伏跟踪支架的东西向建立挡风墙抵挡横风向风荷载。

#### 参考文献:

- [1] 张爱社,高翠兰,申成军,等. 屋面光伏板风荷载特性数值分析[J]. 计算力学学报, 2016, 33(05): 683-688+737.
- [2] 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.
- [3] 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(07): 8-13.
- [4] 马文勇,柴晓兵,赵怀宇,等. 基于偏心风荷载分布模型的柔性支撑索分配系数研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(12): 305-310.
- [5] 张超,黄小东,陶婷,等. 基于流固耦合模拟的光伏支撑系统风振特性研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(09): 2418-2425.
- [6] 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.
- [7] 王泽国,赵菲菲,吉春明,等. 多排多跨柔性光伏支架的风致振动分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(S2): 75-79.

(下转第 29 页)

- (S1): 1039-1044.
- [11] 朱彦鹏, 杨校辉, 马天忠, 等. 黄土塬地区大直径长桩承载性状与优化设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4):1012-1023.
- [12] 张乾青, 李振宝, 马彬, 等. 刚性与柔性桩承式路堤竖向承载特性分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 991-999.
- [13] 丁凯, 寇利军, 宋臣, 等. 黄土地区后注浆长桩桩基优化设计分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2075-2079.
- [14] 孙玉辉, 张辉, 陈昌彦, 等. 桩基竖向承载力测试及桩土作用数值模拟分析[J]. 岩土工程技术, 2020, 34(6): 311-315.
- [15] 郜新军, 王剑博, 张浩, 等. 水泥砂浆扩体预制桩竖向承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 634-643.
- [16] 邓友生, 宋虔, 张克钦, 等. 锥形帽单桩竖向承载力模型试验研究[J]. 武汉科技大学学报, 2023, 46(6): 472-477.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第 22 页)

- [8] 麻玉山, 董梦龙, 陈松, 等. 电塔塔基边坡受风荷载影响的稳定性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(04):63-70.
- [9] HE X H, DING H, JING H Q, 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.
- [10] 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.
- [11] 吉柏锋, 邢盼盼, 吴会平, 等. 移动型下击暴流作用下定日镜动力响应特性研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(01):30-38.
- [12] 刘志超. 带弹性抗风索的柔性光伏支架的受力性能[D]. 南京:东南大学, 2021.
- [13] 陈俊岭, 高洁, 阳荣昌. 钢筋混凝土吸热塔顺风向风振响应特征与影响因素分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1):413-419.
- [14] 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, 2019.
- (责任编辑 周雪梅)

## 《河北工程大学学报(自然科学版)》2024 年起由季刊变更为双月刊

为进一步缩短论文出版周期,更快推动科研成果的传播,满足广大专家学者学术交流需要,经主管主办单位同意,申请期刊刊期变更,获得河北省新闻出版局批复(冀新闻出版[2024]-060000001),《河北工程大学学报(自然科学版)》于 2024 年第 1 期起由季刊变更为双月刊,每逢双月的 25 号出版,特此公告。