

柔性光伏支架结构研究综述

李晓诚¹, 张营营¹, 周 祎², 徐俊豪¹

¹中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州

²西南交通大学土木工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年3月19日; 发布日期: 2023年3月29日

摘 要

在全球能源枯竭问题越来越严重的情况下, 太阳能作为一种可再生的绿能源在我国能源结构中的比重越来越高, 光伏发电项目的发展也越来越迅速。由于传统的地面刚性光伏支架具有一定的场地限制性, 近年来一种由预应力拉索体系所组成的大跨度柔性光伏支架结构正得到越来越多的应用。新系统采用悬索来承受光伏组件的负载, 具有适应复杂地形条件、占地面积小、场地适应性强的特点。但由于柔性组件刚度较小、自重轻、跨度大, 受风致效应明显, 所以比较关键的问题是抗风设计。本文对新型柔性光伏支架结构进行概述, 并总结了近年来关于柔性光伏支架的结构设计模型、风致效应等相关研究的文章, 并进行总结综述, 为后续研究提供参考。

关键词

光伏支架, 悬索, 结构设计, 风致响应

A Research Review of Flexible Photovoltaic Support Structure

Xiaocheng Li¹, Yingying Zhang¹, Yi Zhou², Junhao Xu¹

¹School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

²School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: Mar. 19th, 2023; published: Mar. 29th, 2023

Abstract

In the case of more and more serious global energy depletion problems, solar energy as a kind of renewable green energy in the energy source structure of our country is higher and higher, and the development of photovoltaic power generation projects is more and more rapid. Due to the limita-

文章引用: 李晓诚, 张营营, 周祎, 徐俊豪. 柔性光伏支架结构研究综述[J]. 土木工程, 2023, 12(3): 290-297.

DOI: 10.12677/hjce.2023.123033

tion of the traditional rigid ground photovoltaic support, a long-span flexible photovoltaic support structure composed of the prestressed cable system is being used more and more in recent years. The new system uses suspension cables to withstand the load of photovoltaic modules, which has the characteristics of adapting to complex terrain conditions, small footprint and strong site adaptability. However, due to the small stiffness, light weight and large span of flexible components, the wind effect is obvious, so the key problem is the wind resistance design. In this paper, the new flexible photovoltaic support structure is summarized, and the related research articles on the structural design model and wind-induced effect of the flexible photovoltaic support structure in recent years are summarized, so as to provide a reference for subsequent research.

Keywords

Photovoltaic Support, Cable, Structural Design, Wind-Induced Response

Copyright © 2023 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

在全球能源枯竭问题越来越严重的情况下, 太阳能作为一种可再生的绿色清洁能源, 越来越瞩目, 太阳能能源在我国能源结构中的所占比重也越来越高[1] [2] [3]。并且随着 2020 年我国在联合国大会上提出了“双碳”目标, 光伏发电项目作为有效实现“双碳”政策的一项重要措施, 其发展也越来越迅速[4]。

目前, 光伏发电系统用的较多的支撑系统主要分为两类, 一类是活动式支撑系统, 一类是固定式支撑系统, 其中前者主要用于可以对太阳位置进行跟踪的发电系统, 而在建筑上用得较少, 因此, 这里主要讨论适用于建筑中的最为普遍的固定式支撑系统[5] [6]。

固定式支撑系统根据其结构材料类别可以分为传统刚性光伏支架结构和新型柔性光伏支架结构。目前, 传统光伏支架多建设于荒漠、戈壁等占地面积大、平整度高的场地, 在地形条件较差的区域建设难度大, 因而建设发展受限于土地资源, 如图 1 所示。由于传统的地面刚性光伏支架具有一定的场地限制性, 近年来一种由预应力拉索体系所组成的大跨度柔性光伏支架结构正得到越来越多的应用[7]。新系统采用悬索来承受光伏组件的负载, 具有适应复杂地形条件、占地面积小、场地适应性强的特点, 如图 2 所示。它为公路、农场、污水处理厂和鱼塘等特殊场所的传统结构提供了良好的补充[8]。柔性光伏支架已被提议取代传统的梁支撑光伏组件, 但由于柔性组件刚度较小、自重轻、跨度大, 受风致效应明显, 所以比较关键的问题是抗风设计。因此, 本文对新型柔性光伏支架系统进行概述, 并总结了近年来关于柔性光伏支架的结构设计模型、风致效应等相关研究的文章, 并进行总结综述, 为后续研究提供参考。

2. 柔性光伏支架结构设计相关研究

2.1. 光伏支架结构概述

固定式光伏支架结构根据支架不同可以分为传统的刚性支架和柔性光伏支架。传统的刚性支架主要由刚性材料如铝合金、钢材、复合材料等来支撑起整个光伏面板, 如图 1 所示, 根据使用场地可以分为地面式光伏支架、建筑上光伏支架、水上光伏支架、船舶上光伏支架等[9]。但由于支撑材质的重量及承载方式决定了传统刚性支架的适宜跨度过小, 受场地限制明显。

柔性光伏支架指的是由柔性承重索、钢立柱、钢斜柱或斜拉索、钢梁及基础组成的一种支架, 其包

含的主要构件如图 3 所示，具有结构简单、材料使用较少、质量轻、建设周期短等传统支架所缺乏的优点[10]。柔性光伏支架的承重索采用钢绞线等柔性组件，此类柔性组件具有弹性模量大、松弛率低、强度高优点，能够进行大跨度张拉，从而规避场地的起伏等不利因素[11] [12]。柔性光伏支架结构根据承载索结构体系的不同可以分为单层悬索结构、双层悬索结构、张弦梁结构。



Figure 1. Traditional photovoltaic support system
图 1. 传统光伏支架系统



Figure 2. New flexible photovoltaic support system [13]
图 2. 新型柔性光伏支架系统[13]

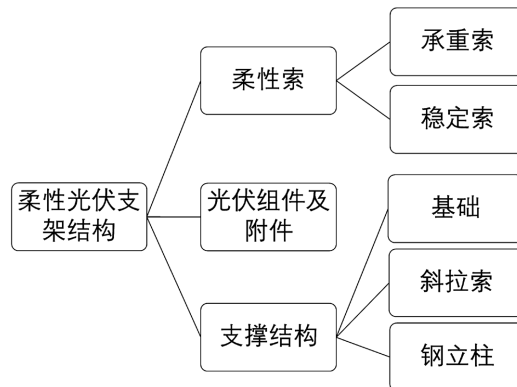


Figure 3. System decomposition of flexible photovoltaic support structure
图 3. 柔性光伏支架结构系统分解

柔性光伏支架根据光伏组件支撑结构材质的不同大概可以分为以下四类，如表 1 所示。

Table 1. Classification and characteristics of flexible photovoltaic supports

表 1. 柔性光伏支架分类及特征

类别	光伏组件支撑	特征
I	钢丝绳	适用于大跨度、高净空的场景，由于钢丝绳预应力不足，会导致变形过大，风载下易发生光伏组件扭转、导致光伏组件损伤。
II	钢绞线	预应力在承受外荷载允许，但平面外抗扭刚度不足，风载下易发生组件变形不均匀，存在隐裂隐患。
III	双层预应力索结构、排间连杆	光伏组件变形可控制，面外抗扭刚度充足，前后关联性强，适用于平地项目，但工程造价偏高。
IV	预应力镀锌钢绞线	抵抗外荷载能力大幅提升，跨中的柔索抗风系统使抗风性能提高。

2.2. 柔性光伏支架结构设计计算模型

柔性光伏支架计算模型大概可以分为力学简化设计模型以及有限元分析模型两种。设计软件和通用有限元软件需根据实际工程采用整体模型进行计算，此模型为精细化计算模型[13]。

牛斌建立了单层索、索桁架的力学简化模型，分析了结构的受力特称，对比了两者的不足。利用 SAP2000 软件建立了索桁架光伏支架系统的有限元精细化模型，对整体进行力学分析，得到了重力作用以及风荷载下结构整体的变形[14]。

唐俊福对斜拉索、钢斜柱、八字形钢斜柱三种形式的柔性光伏支架建立了有限元分析模型，并分析对比了三种结构在水平力荷载下的受力特点，并给出了水平承载构建与对面夹角的合理范围值，提出了不同地质条件下适用的结构形式[15]。

杨政利用 SAP2000 软件对单层悬索结构光伏支架建立了有限元分析模型，考虑光伏组件对拉索的作用，对单层悬索光伏支架进行整体受力分析，获取了边梁的弯矩、挠度、拉索最大变形以及光伏组件最大应力。包含支座位移的情况下对光伏支架结构种拉索在承受外荷载作用下的变形进行了公式简化推导，为了验证简化算法的准确性，结合工程算例进行验证，两者计算结果相差不足 5% [16]。

刘丹采用 SAP2000 软件对预应力双层悬索结构进行有限元建模计算，得到了在不同张拉索预应力状态下的结构自振周期、结构振型状、悬索挠度、主要构件应力的变化规律，给出了满足正常使用极限状态下的悬索预应力值[17]。

刘丹介绍了一种带揽风索的张弦梁光伏支架体系，利用 SAP2000 建立整体模型，进行了不同施工阶段的模拟计算和对比分析，通过对比主索在不同张拉力作用下结构的响应，得出了张弦梁光伏支架最佳张拉控制方案，同时也分析了揽风索在这类结构中的重要性，掌握了主索在不同张拉力作用下，各类构件的内力、变形变化特征，主索施加不同的预拉力，对结构竖向刚度无显著影响，结构的振型特征无明显变化；张弦梁结构平面外刚度较弱，上弦钢梁和下弦主索均需要设置可靠的平面外支撑体系，避免结构在平面外失稳。改变主索张拉力，张弦梁结构的竖向刚度没有显著变化[18]。

尚仁杰考虑了悬索结构的非线性，建立了拉索在竖向荷载下的力学简化模型，推导出了索结构在均布荷载下的刚度解析解，索结构的刚度分为索拉伸刚度和初始拉力的刚度，并给出了简化计算方法。结合工程案例进行静力计算，采用 ANSYS 有限元分析软件进行辅助验证，结果表明，提出的简化计算方法准确可行，误差在 0.5%之内[11]。

现有的研究在对支架结构静力分析时，主要通过建立有限元模型以及力学简化模型对结构整体进行

参数分析,主要探究主索预应力值对结构变形、结构刚度、构件应力等的影响规律。研究者们通过数值模拟和实验研究,得出了不同结构体系、不同材料的柔性光伏支架的承载能力情况,为柔性光伏支架的工程应用提供了重要参考。但基本上将光伏组件对支架结构的作用简化为均布线荷载,往往忽略了光伏组件对承载索的影响。这些文献都从不同的角度对柔性光伏支架结构的静力计算方法进行了研究,结合各自的研究结果和实际应用情况,对不同的计算方法进行了对比分析。其中,唐俊福、刘丹等人的文章从结构力学的角度出发,对不同的柔性光伏支架结构形式进行了分析和对比;尚仁杰等人的文章则对不同的静力计算方法进行了详细介绍和比较,指出了各自的优缺点和适用范围,旨在提高光伏系统的可靠性和经济性。这些研究都对柔性光伏支架结构的静力计算方法进行了深入的研究和探讨,为今后的研究提供了重要的参考和借鉴。

3. 柔性光伏支架抗风性能研究现状

柔性光伏支架的承载索是一种可变体系,自重轻,稳定性以及抗风能力差。在绝大多数情况下,风荷载作为光伏支架结构设计控制荷载。风能对光伏板有两种不同类型的影响:风的积极影响是增加光伏板的冷却,这有助于降低电池温度,这对于保持光伏转换效率至关重要;风的负面影响是对光伏板施加力,这可能导致重大的结构损坏[19]。目前,在光伏结构设计的建筑标准和规范中,对风荷载的规定还很缺乏。对于柔性光伏支架抗风性能研究的方法主要有现场实测、风洞试验以及数值模拟三种[20] [21]。现场实测虽然可以得到最真实准确的数据,但是会耗费大量成本,并且该方法难以实现;所以大多数的研究集中在风洞试验以及数值模拟中,因此本节对主要对这两方面相关研究进行总结。

刘丹介绍了一种带揽风索的张弦梁光伏支架体系,利用 SAP2000 进行风载下结构整体模拟,结果表明,在风压力和风吸力两种工况下的揽风绳起到的作用都随着主索张拉力值的增加而变小。因此,为了保证揽风绳发挥作用,应在主索预拉力较大时对揽风绳也施加一定的预拉力[18]。

程堂华利用 SAP2000 软件对单跨索结构光伏支架进行整体建模,风载对整体最不利的工况时风载方向与光伏组件方向垂直。对比了在垂直情况下风从光伏组件正反面下的索轴力变化情况,考虑了不同光伏板倾角下,光伏组件的风载体型系数的变化规律,结果表明,150°风向角时为整体最不利工况[22]。

马文勇进行了刚性模型的风洞试验,考虑了风向角、光伏组件倾角、光伏面板间距比对光伏组件承受荷载以及风载体型系数的影响,风向角在 150 度时风荷载最大,风载体型系数随着面板倾角的增加呈线性增长。试验得到组件表面体型系数的分布情况,基于试验结果,对风荷载标准值计算公式计算修正,在公式中引入了位置系数、方向角系数[23]。

蔡华建立了新型悬索光伏支架结构动力分析的向量式有限元模型,分析结构的风致位移和内力响应特点。定义表征结构风致动力响应的单边标准差,指出可采用正态分布函数近似分析动力响应的保证率。考察预应力、索截面面积、结构跨度、光伏板倾角以及基本风压分别对悬索光伏支架结构风致响应的影响规律。强调支架结构的风振响应取决于结构在平均风作用下平衡构型的性质,阐明结构风致准静力响应标准差与动力响应标准差高度相关,并提出了一种准静力响应标准差的计算策略,利用大规模参数分析结果,拟合出采用结构风致准静力响应标准差来估算风致动力[24]。

杜航通过对一种可变倾角的大跨柔性光伏支架结构进行刚性模型风洞测压试验,研究了光伏组件板面的平均风压和脉动风压系数在不同风向角和倾角组合下的分布特性以及全风向角下组件的极值风压变化规律,并给出了典型风向角下的脉动风压功率谱图。在此基础上,结合光伏组件的风压分布特点,采用 ANSYS 有限元软件仿真研究了该种柔性支撑光伏支架的风振响应,并进一步计算得到了相应的风振系数。研究表明:在 0 度和 180 度风向角下,平均风压系数沿来流方向梯度分布且绝对值迅速衰减;随着风向角的增大,风压系数绝对值的最大值出现位置由迎风前缘向迎风端角部附近移动;光伏板面脉

动风压分布与平均风压分布趋势类似；相比结构位移响应，钢索张力响应对风速变化不敏感，顺风向和竖向位移风振系数在 $U = 8 \text{ m/s}$ 取得极大值，其值为 2.11 和 1.98 [25]。

Liu 从实验和数值分析两个方面对柔性光伏模块在风载荷下的性能进行了评估。采用基于 LES 算法的 CFD 数值模拟对不同风速和风向条件下模块的应力和变形进行计算和分析。光伏板下缘处风致应力最大，前表面中点处风致应力最小；然而，对于光伏电池板的背面，注意到相反的情况，最高的应力在面板的中间，而最低的应力在光伏太阳能电池板背面的下边缘。一般情况下，在光伏电池板前表面，位于光伏电池板边缘的传感器受到的应力大于位于光伏电池板中心的传感器，而位于光伏电池板后表面边缘的传感器受到框架的遮挡，使其受到的应力小于中心线的应力。研究结果表明，柔性光伏模块的动态响应特性和风载荷响应特性受风速和风向的影响[26]。

Abdollahi 利用计算流体力学(CFD)数值模拟方法，将风负载简化为均匀荷载对光伏组件在静风荷载作用下的变形和鲁棒性进行了评价。对不同风速和风向下的面板和支架进行应力分析，并给出设计、安装使用建议，以确保光伏模块的安全性和合格性[27]。

Wood 对安装在比例建筑模型平屋顶上的光伏组件进行风洞试验测试。测量了建筑物屋顶的压力，结果与德州理工学院实验大楼的全尺寸结果吻合较好。结果表明，作用在面板上的净压力系数的波动，峰值在-0.2 和 0.2 之间变化。在这些测试中，屋顶和面板之间的间隙高度以及面板间距的变化对模型整体压力没有显著影响[28]。

Li 采用 FLUENT 数值模拟和风洞试验相结合的方法，基于雷诺平均 Navier-Stokes (RANS)方法，研究了安装在建筑物屋顶上的光伏阵列的风压分布。通过数值模拟与风洞实验结果比较，评判了不同 RANS 模型的精度，并确定了最准确的预测该类型流动的 RANS 模型。其中，SSTK- ω 模型可以准确预测面板上游的平均风扬。以 20° 为间隔，对 $0^\circ \sim 180^\circ$ 风角下的风流场进行了数值模拟，得到了净风压力分布。研究了光伏阵列倾斜角度对流场的影响，分析了光伏板压力分布与流场的关系。此外，还研究了光伏阵列与建筑屋顶间隙对光伏阵列倾斜角度相关的流场和压力分布的影响[29]。

Meroney 使用不同的湍流模型来模拟 PV 组件周围的流动。他们研究了太阳能电池板支撑系统的阻力、升力和倾覆力矩， 0° 和 180° 风角下面板静压结果显示面板前排压力较大[30]。

学者们主要通过风洞试验和数值模拟两种手段[26] [31]。通过考虑不同的变量，进行缩尺风洞试验并结合数值模拟结果进行对比，得到了风载作用下最不利光伏板倾角、风载体型系数变化规律、风荷载修正计算公式等，对柔性光伏支架结构抗风设计提供参考。但现有研究基本没有考虑流固耦合效应在柔性光伏支架受风载下的影响。现有研究对不同类型的柔性光伏面板在风载荷下的力学性能进行了研究。实验部分采用模拟风速、风向和角度等不同条件，对不同类型的柔性光伏面板的风载荷响应特性进行了测试，并通过对比分析得出了不同类型面板的相对优劣。数值模拟部分则采用 ANSYS 软件对不同风速和角度下的风场进行了模拟，并对模板的应力和变形进行了计算和分析。研究结果表明，柔性光伏面板的结构形式、材料特性、风向和角度等因素都会影响其在风载荷下的性能表现，而相比于刚性光伏支架结构，柔性光伏面板的自适应性和弯曲性能可以在一定程度上提高其抗风能力和稳定性。这些文章共同表明，柔性光伏支架结构的抗风能力与其材料特性、结构形式和固定方式等因素密切相关。

4. 结论与展望

传统的光伏支架系统往往受限于地形，而新型柔性光伏支架系统具有不受场地限制的特点，被广泛应用在光伏项目中。悬索结构有一个比较大的缺点就是稳定性不好、抗风能力差。本文对柔性光伏支架进行综述，主要包括索结构的静力计算方法以及抗风振作用。静力计算大致可以分为力学简化设计模型以及有限元分析模型两种。现有研究中的力学简化设计模型即提取结构中的主要承载构件，考虑索的非

线性, 提出简化设计方法。有限元分析模型通常采用 SAP2000、ANSYS 等有限元设计软件对工程实例建立整体模型, 考虑不同变量对结构的静力性能如变形、应力等影响。抗风性能大多集中在对模型进行风洞试验, 获取不同变量如风向角、面板倾角等对风载体型系数的影响, 得出风载下的最不利工况, 提出新的风荷载简化计算方法, 给出考虑风载下的光伏支架结构设计建议。

基金项目

江苏省科研与实践创新计划项目(KYCX21_2282); 中国矿业大学研究生创新计划项目(2021WLJCRCZL026)。

参考文献

- [1] 钟坤炎. 不同支架结构形式的屋顶分布式光伏发电系统太阳辐照度研究[J]. 电气技术与经济, 2022(5): 10-13.
- [2] Chou, C.-C., Chung, P.-H. and Yang, R.-Y. (2019) Wind Loads on a Solar Panel at High Tilt Angles. *Applied Sciences*, **9**, Article No. 1594. <https://doi.org/10.3390/app9081594>
- [3] Guo, M., Zang, H., Gao, S., Chen, T., et al. (2017) Optimal Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Modules Using HS Algorithm in Different Climates of China. *Applied Science*, **7**, Article No. 1028. <https://doi.org/10.3390/app7101028>
- [4] 王琼, 王国光. 浅谈建筑光伏一体化工程应用[J]. 智能建筑电气技术, 2022, 16(2): 163-168.
- [5] 陈忱, 方海, 陈祥喜, 韩娟. 太阳能光伏支撑结构的研究进展与应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 365-372.
- [6] 邓鑫. 建筑用光伏的设计与优化方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [7] 周润. 柔性光伏支架结构设计探讨[J]. 能源与节能, 2023(1): 22-24+170.
- [8] 何春涛. 大(中)跨距柔性支架技术与多场景应用[C]//上海市太阳能学会. 第十八届中国太阳级硅及光伏发电研讨会(18th CSPV)论文集: 2022 年卷. 2022.
- [9] Liu, H., Zhang, Q., Qi, X., Han, Y. and Lu, F. (2017) Estimation of PV Output Power in Moving and Rocking Hybrid Energy Marine Ships. *Applied Energy*, **204**, 362-372. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.014>
- [10] 郑云汉, 黄华, 何银涛, 张梅. 柔性太阳能支架耐久性研究进展[J]. 科技与创新, 2016(19): 117+119.
- [11] 尚仁杰, 蒋方新, 孙悦, 王国辉. 考虑几何非线性的柔性光伏支架变形与刚度分析[EB/OL]. 力学与实践, 2022: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2064.O3.20221024.1111.014.html>, 2022-10-25.
- [12] 刘兴佳, 崔国桥, 于恺, 等. 太阳能光伏柔性支架体系研究[J]. 中国新技术新产品, 2020(2): 79-81.
- [13] 白荣丽. 新型悬索式支撑系统在渔光互补项目中的应用研究[J]. 太阳能, 2022(10): 74-78.
- [14] 牛斌. 大跨度预应力索桁架光伏支承结构的设计[J]. 太阳能, 2018(7): 19-22.
- [15] 唐俊福, 林建平, 霍静思. 柔性光伏支架结构特性分析及其优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 331-337.
- [16] 杨政, 贺拥军, 全勇. 单层悬索光伏支架静力分析及简化计算方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9252-9259.
- [17] 刘丹. 柔性悬索结构在光伏项目中的应用分析[J]. 山西建筑, 2022, 48(15): 59-62.
- [18] 刘丹. 张弦梁结构体系在光伏项目中的应用分析[J]. 山西建筑, 2022, 48(18): 53-56.
- [19] Abiola-Ogedengbe, A., Hangan, H. and Siddiqui, K. (2015) Experimental Investigation of Wind Effects on a Standalone Photovoltaic (PV) Module. *Renewable Energy*, **78**, 657-665. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.037>
- [20] Hsu, S.-T. and Lien, C. (2018) Evaluations of Wind Effect on PV Module by Non-Uniform Mechanical Loads System and Mean-Surface Pressure Pattern. 2018 *IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa, 10-15 June 2018, 405-408. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547493>
- [21] Bender, W., Waytuck, D., Wang, S. and Reed, D.A. (2018) In Situ Measurement of Wind Pressure Loadings on Pedestal Style Rooftop Photovoltaic Panels. *Engineering Structures*, **163**, 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.021>
- [22] 程堂华, 蔡锟, 安庭震, 王军. 预应力柔性光伏支架柔索受力分析[C]//工业建筑杂志社. 2022 年工业建筑学术交

-
- 流会论文集(下册): 2022 年卷. 北京: 工业建筑杂志社, 2022.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 杜航, 徐海巍, 张跃龙, 楼文娟. 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.
- [26] 刘志超. 带弹性抗风索的柔性光伏支架的受力性能[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
<https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2021.001582>
- [27] Abdollahi, R. (2021) Impact of Wind on Strength and Deformation of Solar Photovoltaic Modules. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 21589-21598. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12111-1>
- [28] Wood, G.S., Denoon, R.O. and Kwok, K.C. (2001) Wind Loads on Industrial Solar Panel Arrays and Supporting Roof Structure. *Wind and Structures*, **4**, 481-494. <https://doi.org/10.12989/was.2001.4.6.481>
- [29] Li, J., Tong, L., Wu, J. and Pan, Y. (2019) Numerical Investigation of Wind Pressure Coefficients for Photovoltaic Arrays Mounted on Building Roofs. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **23**, 3606-3615.
<https://doi.org/10.1007/s12205-019-2320-3>
- [30] Meroney, R.N. and Neff, D.E. (2010) Wind Effects on Roof Mounted Solar Photovoltaic Arrays: CFD and Wind-Tunnel Evaluation. *The 15th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, Chapel Hill, 23-27 May 2010, 8 p.
- [31] Cao, J.X., Yoshida, A., Saha, P.K. and Tamura, Y. (2013) Wind Loading Characteristics of Solar Arrays Mounted on Flat Roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **123**, 214-225.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.014>