

基于索结构的光伏跟踪系统的设计与应用

赵悦¹, 王康杰¹, 石玉斌¹, 孙洪岩², 李士鹏²

¹中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州

²天津大学机械学院, 天津

收稿日期: 2026年5月18日; 录用日期: 2026年6月11日; 发布日期: 2026年6月17日

摘要

针对传统光伏支架系统存在的结构局限性与发电效率不足的问题, 本文提出了一种融合柔性结构与主动跟踪功能的创新光伏支架系统, 实现了光伏板角度的高效调节。研究基于柔性钢索结构, 创新性地设计了横梁-中心旋转轴复合结构、配合推力轴承与深沟球轴承组合设计, 有效克服钢索预紧力(最高达120 kN)产生的轴向载荷, 使转动机构所需驱动扭矩大幅降低; 以及集成翻转机构与蜗轮蜗杆驱动系统, 解决了柔性索结构与角度调节的兼容性问题, 实现了光伏板 $\pm 50^\circ$ 无级调节。采用预应力钢拉杆结构确保系统在120 kN索力与45°倾角工况下的可靠性(最大应力235 MPa, 低于Q355屈服强度)。PVsyst仿真结果表明, 跟踪式柔性系统在天津地区的年辐射接收量较10°和35°固定式系统分别提升9.88%和4.48%, 年发电量提升10.79%和4.5%。本研究为柔性光伏支架的跟踪功能实现提供了关键技术支撑, 其结构优化方法可推广至其他大跨度可调结构领域。

关键词

柔性光伏支架, 跟踪光伏支架

Design and Application of a Photovoltaic Tracking System Based on Cable Structure

Yue Zhao¹, Kangjie Wang¹, Yubin Shi¹, Hongyan Sun², Shipeng Li²

¹PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou Zhejiang

²School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin

Received: May 18, 2026; accepted: June 11, 2026; published: June 17, 2026

Abstract

In response to the structural limitations and insufficient power generation efficiency of traditional

文章引用: 赵悦, 王康杰, 石玉斌, 孙洪岩, 李士鹏. 基于索结构的光伏跟踪系统的设计与应用[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(3): 346-361. DOI: 10.12677/met.2026.153035

photovoltaic (PV) support systems, this paper proposes an innovative PV support system that integrates flexible structures with active tracking functions, achieving efficient adjustment of the PV panel's angle. The research is based on a flexible steel cable structure, innovatively designing a composite structure of crossbeams and central rotating shafts, combined with thrust bearings and deep groove ball bearings, effectively overcoming the axial load caused by the cable pretension force (up to 120 kN), significantly reducing the required driving torque of the rotating mechanism; and integrating a flipping mechanism with a worm gear and worm drive system, solving the compatibility issue between the flexible cable structure and angle adjustment, enabling $\pm 50^\circ$ stepless adjustment of the PV panel. The use of prestressed steel tie rods ensures the system's reliability under a 120 kN cable force and a 45° inclination angle (maximum stress 235 MPa, below the yield strength of Q355). PVsyst simulation results show that the tracking flexible system in Tianjin has an annual radiation reception increase of 9.88% and 4.48% compared to the 10° and 35° fixed systems, respectively, and an annual power generation increase of 10.79% and 4.5%. This study provides key technical support for the realization of tracking functions in flexible PV support systems, and its structural optimization method can be extended to other large-span adjustable structure fields.

Keywords

Flexible Photovoltaic Support System, Tracking Photovoltaic Support System

Copyright © 2026 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

一直以来, 国家都在提倡发展包括风能、太阳能等环保的新式能源, 不但可以减少污染排放和有可持续能源供应, 在可持续发展中起到关键作用。同时推动能源的转型和多元化发展, 减少对煤炭、石油等传统化石能源的依赖, 提高国家战略上的能源供应的安全性和稳定性。与此同时, 风能和太阳能等新能源的发展, 有助于降低能源成本和促进相关行业的发展等诸多经济效益。单就太阳能来说, 在国家政策和市场需求的双重推动下, 光伏发电产业得到了大力发展。其中用于铺设和支撑光伏板的光伏支架成为这些年来光伏产业中比较受关注的领域之一。正是因为有了光伏支架, 光伏板才能广泛地布置于各种环境下, 无论是城市中还是自然环境中。光伏支架系统从是否具有跟踪太阳能光照角度的功能可分为固定式和跟踪式两大类型, 每种类型根据结构形式又可以分为刚性结构和柔性结构(索结构)(如图 1)。

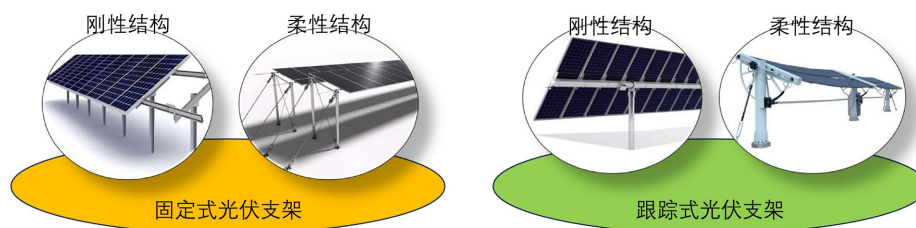


Figure 1. Classification of photovoltaic support structures

图 1. 光伏支架分类

光伏支架系统需在结构成本与发电效率之间寻求平衡。目前, 光伏支架系统主要以固定式刚性结构为主, 但是存在光伏板角度无法调整、跨度低、用钢量和桩基础密度大等缺点。而固定式柔性光伏支架

的应用方面,管迎春[1]、李成志[2]、张东栋[3]、闭尚东[4]等人通过国内部分应用案例,根据项目的实际情况进行了针对性的设计和优化,并提出了设计方向和思路。虽然固定式柔性光伏支架解决了跨度低、用钢量大等缺点,却无法实现光照跟踪,导致发电效率提升有限。

光伏板的角度如果可以进行调节,就可以根据各地区维度以及时节的不同,所产生的阳光入射角度的不同而进行跟踪和调整,使光伏板表面随时保持跟踪阳光入射角度,从而提高发电效率,更有效地利用太阳能。Bashar Hammad [5]、黄宁[6]、余俊杰[7]、Thomas Huld [8]等人通过分析对比均得出跟踪式光伏系统的发电效率普遍高于固定式光伏系统。虽然跟踪式刚性光伏支架系统拥有跟踪功能,但是建造成本比固定式光伏支架高。管迎春[1]、蔡凌飞[9]、李立[10]等人通过实际工程项目分析比对固定式刚性支架与固定式柔性支架的建造成本,得出柔性光伏支架的总建造成本低于刚性光伏支架,具体降本比例根据项目的不同而不同。可以通过采用柔性光伏支架的同时,将节省的成本用在增加跟踪功能上,即跟踪式柔性光伏支架系统,从而提高整个光伏系统的发电效率。但现有研究未解决柔性结构与跟踪功能的兼容性问题。

综上所述,通过成本转移的方式,利用跟踪式柔性光伏支架系统将跨度大、桩基础密度小、用钢量少的优势,不仅可以布置在刚性光伏支架的区域,还可以布置在刚性光伏支架无法很好胜任的山区、湖泊、沙漠、湿地等地区。同时自身具备的太阳跟踪的结构可以提高发电效率,相比固定式光伏支架的太阳辐射利用率更高。

2. 跟踪式柔性光伏支架的设计

2.1. 跟踪式柔性光伏支架的设计思路

为实现对太阳入射角的主动跟踪,本研究在传统固定式光伏支架(主要由桩基础、整体支撑结构和光伏板支撑结构组成)的基础上进行改进,提出在整体支撑结构与光伏板支撑结构之间增设传动与动力机构(图2)。具体设计思路为:基于柔性光伏支架的基本架构,在刚性支撑结构和钢索系统之间集成一套翻转机构,通过该机构驱动钢索整体运动,从而实现所有连接光伏板的同步角度调整。这种一体化设计既保留了柔性支架的轻量化优势,又实现了光伏板朝向的主动控制功能。

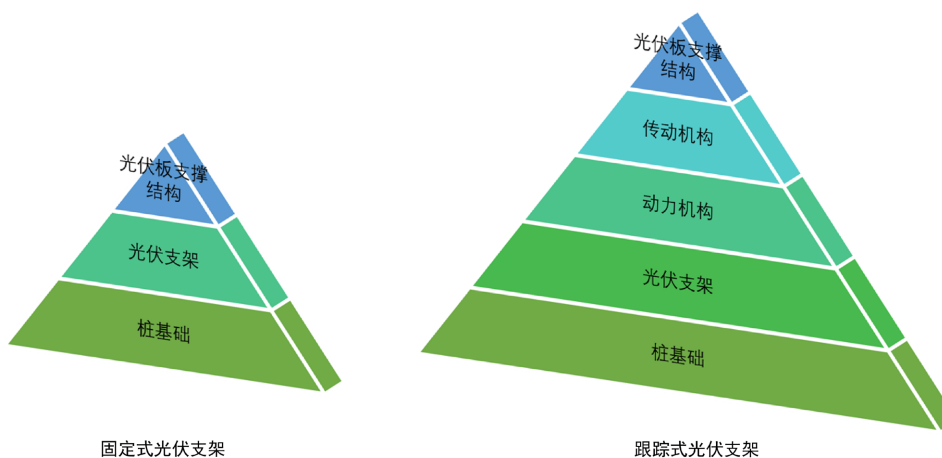


Figure 2. Comparison of fixed and tracking photovoltaic support structures
图2. 固定式和跟踪式光伏支架结构组成对比图

根据此思路,需要在整体结构设计中需要重点考虑刚性支撑结构、翻转机构、驱动机构的设计,尤

其是翻转机构与预紧力钢索固定连接之后，由于预紧力过大导致的翻转机构受力而产生的强度和寿命问题。在设计过程中考虑到用料成本等问题，重点采用化结构的设计思路增加强度，而非单纯的加粗加厚。整体框架如图 3，项目采用四索两跨结构形式，每跨 6 块 550 W 的光伏板，共 12 块光伏板。

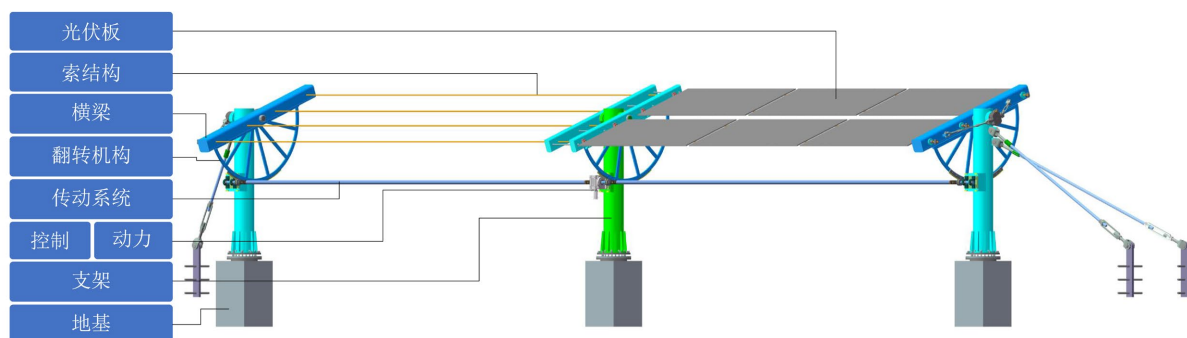


Figure 3. The framework of the tracking flexible photovoltaic support structure

图 3. 跟踪式柔性光伏支架整体构架图

2.2. 刚性支撑结构的设计

在普通柔性光伏支架中，预紧力钢索需要固定在刚性支撑结构上，从而导致支撑结构会受到较大的轴向拉力。为了实现钢索和光伏板的整体翻转，支撑结构上需要增加轴承和可翻转的横梁(图 4)，通过横梁的翻转带动光伏板组件的翻转。钢索固定在横梁上，索向拉力会直接作用在可翻转的横梁上，导致横梁受到较大的应力，所以在横梁与刚性支撑结构的连接上需要重点考虑强度问题。

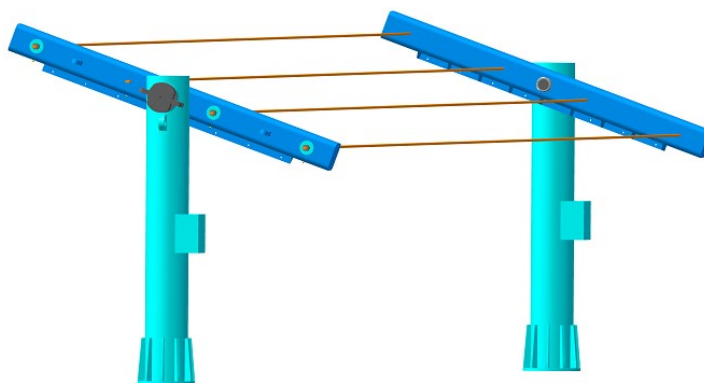


Figure 4. Demonstration of the connection of beams, columns and cables

图 4. 横梁、立柱和钢索连接整体示意图

同时在横梁内部增加空心轴的支撑结构以及横梁和轴之间增加斜拉杆的结构形式提高横梁的受力强度。为了保证立柱和横梁在受力情况下的强度，在立柱后横梁后方都增加的钢拉杆进行加强。为了不影响横梁与轴的转动，横梁的钢拉杆一端连接在中心轴上。采用钢拉杆结构可以分担立柱和横梁所受的载荷(图 5、图 6)。

2.3. 翻转机构与驱动机构的设计

本实验采用一种横梁 - 中心轴复合承载结构(图 7)与蜗轮蜗杆自锁驱动(图 8)协同作用的新型旋转方案。推力轴承与深沟球轴承组合设计用于分担钢索预紧力产生的轴向载荷及光伏组件、风雪荷载产生的

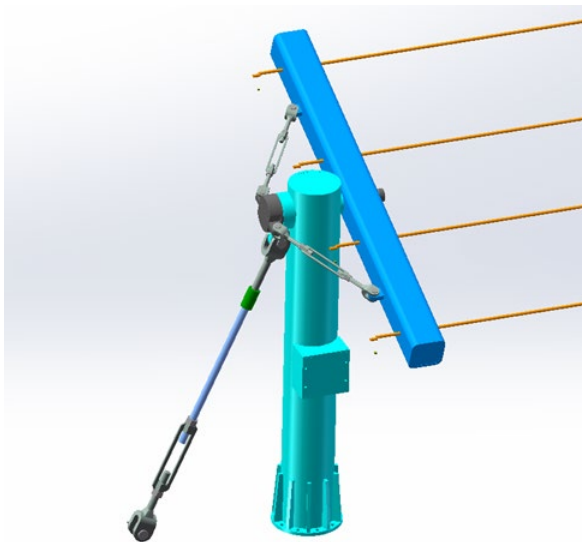


Figure 5. Steel cable connection diagram

图 5. 钢拉杆连接示意图

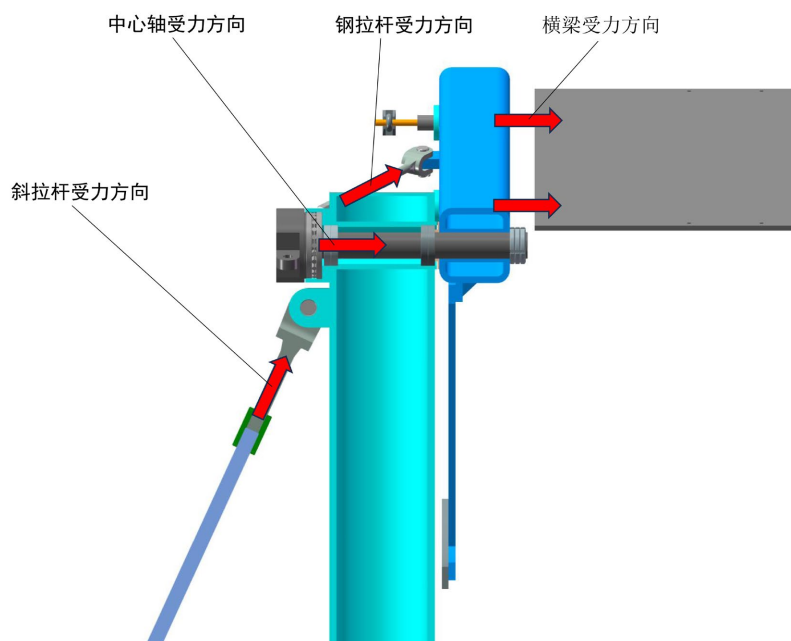


Figure 6. Force direction diagram

图 6. 受力方向示意图

径向载荷,显著降低大预紧力状态下的转动阻力。翻转机构的设计需同时实现角度驱动与长期位置保持,并确保在全寿命周期内抵御风、雪等荷载时不扰动整体结构稳定性。为此,将蜗轮蜗杆机构引入翻转机构,既作为驱动元件,又利用其自锁特性实现角度固定;驱动部分采用伺服电机搭配蜗轮蜗杆减速机,通过齿轮齿条连接横梁以实现精准角度控制(图 8)。同时,各跨间通过传动轴连接以保证多跨协同转动(图 9)。此外,该方案在实现大跨度地形适应性与结构轻量化的同时,可有效提升单位面积光伏组件的发电效益,整体系统在复杂地形光伏电站建设中展现出明确的工程应用价值与推广潜力。

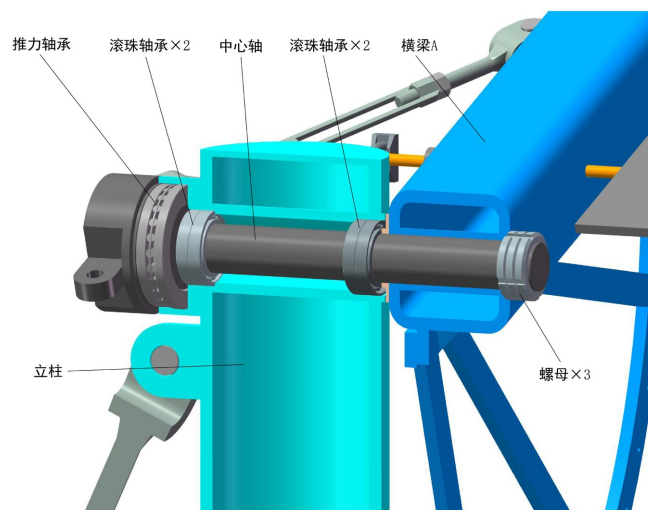


Figure 7. Composite load-bearing structure of beam and central axis
图 7. 横梁-中心轴复合承载结构

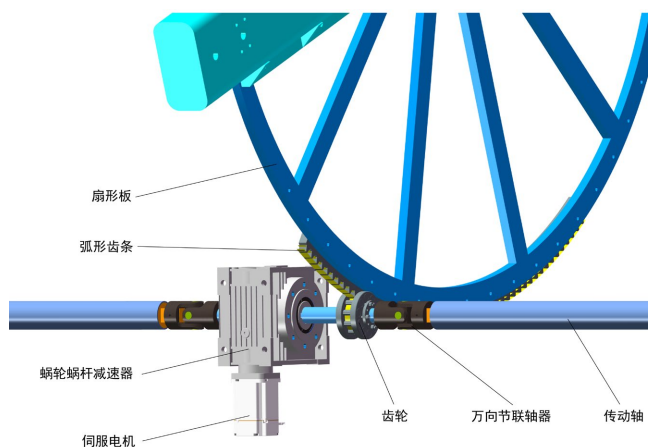


Figure 8. Drive and transmission system diagram
图 8. 驱动与传动系统示意图

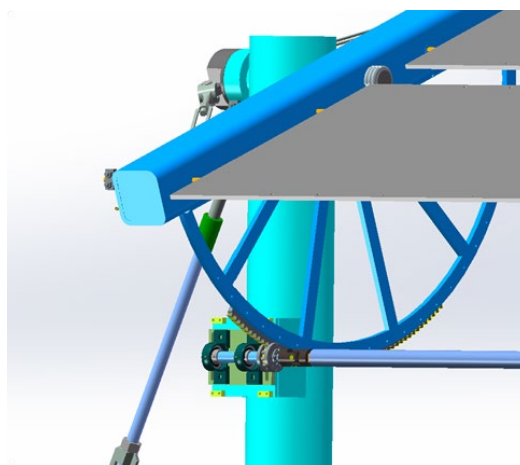


Figure 9. Transmission system and direction diagram
图 9. 传动系统示意图

3. 仿真计算与分析对比

3.1. 建模与网格划分

跟踪式柔性光伏支架的主要结构部件通过 NX 进行三维建模, 随后导入 ABAQUS 进行装配与网格划分(图 10)。网格划分完成后, 依据实际材料参数(表 1)为各部件赋予相应的材料属性, 确保模型材料特性与真实结构一致。

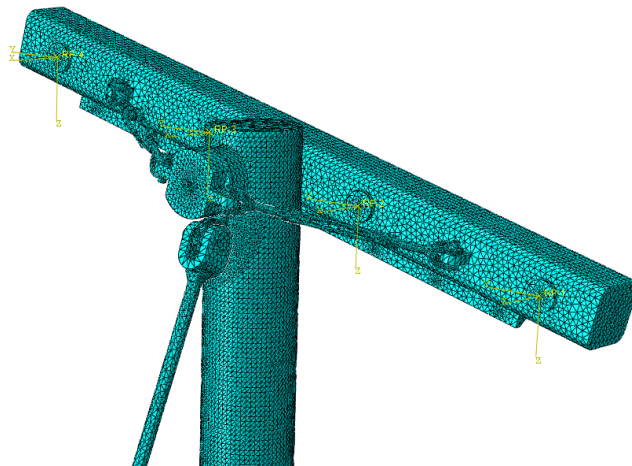


Figure 10. Meshing
图 10. 网格划分

Table 1. Component material list of the tracking flexible photovoltaic support structure
表 1. 跟踪式柔性光伏支架主要构件材料表

名称	规格	长度/mm	材质
立柱	$\phi 300 \times 20$	2150	Q355
横梁	$200 \times 200 \times 18$	2400	Q355
中心轴	$\phi 75$	712	40Cr
钢拉杆	KUUH42-P		35CrMo
小拉杆	KUUH24-P		35CrMo

3.2. 载荷与分析步施加

基于静力学分析方法, 对单侧光伏支架进行有限元仿真。模型底部设置为全固定约束($U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$)。钢索对横梁的拉力通过四个施力点(PR-1 至 PR-4)施加(图 11), 并在各点建立局部坐标系, 其中 x 轴在竖直平面内向下偏转 1.5° , 拉力方向沿 x 轴负向。为研究结构响应, 设置多组工况: 横梁倾角分别调整至 15° 、 25° 、 35° 和 45° , 并在每个施力点施加的 10 kN、20 kN 和 30 kN 的集中力, 以分析不同载荷与角度组合下的力学行为。

3.3. 光伏支架应力分析

有限元计算结果表明(图 12~15), 光伏支架的应力分布呈现明显的局部集中特性。立柱、横梁、中心轴最大应力分别是 231.2 MPa、155.3 MPa、160.8 MPa, 均未超过 Q355 的屈服强度。立柱的最大应力出现在底端内外两侧及长拉杆连接处, 其中底端外侧受拉应力, 内侧受压应力。横梁的应力集中区域主要

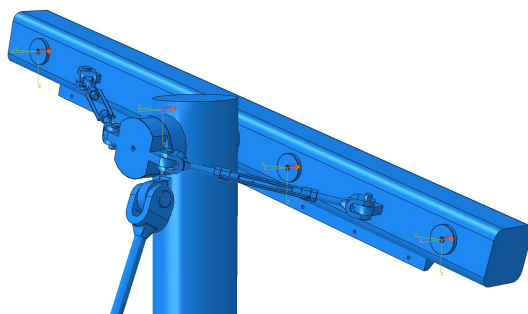


Figure 11. Apply load
图 11. 施加载荷

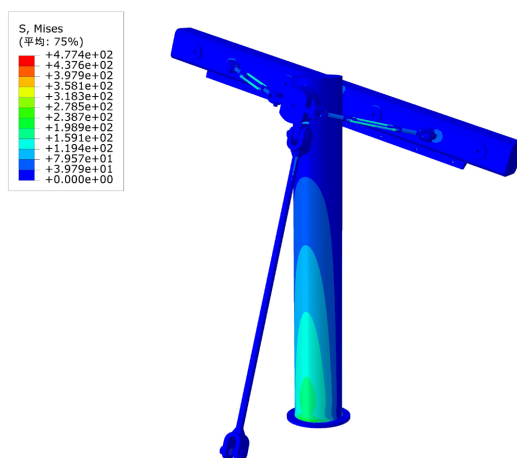


Figure 12. Photovoltaic support stress map
图 12. 光伏支架应力云图

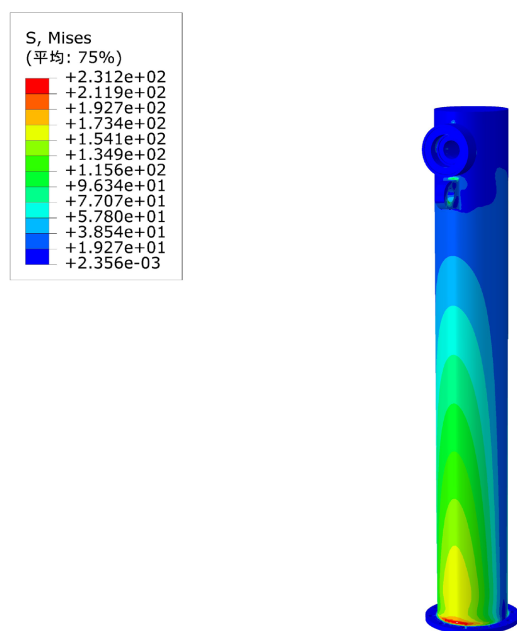


Figure 13. Column stress map
图 13. 立柱应力云图

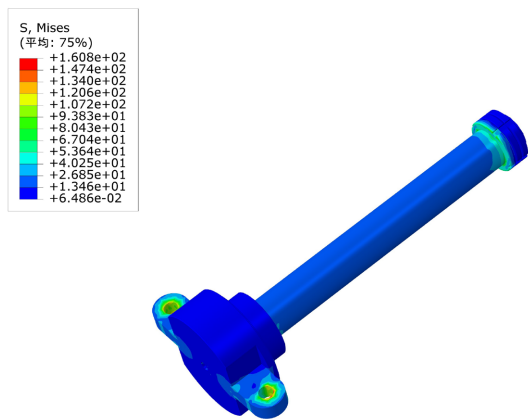


Figure 14. Central axis stress map
图 14. 中心轴应力云图

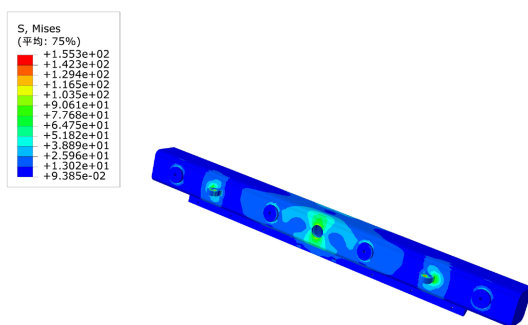


Figure 15. Beam stress map
图 15. 横梁应力云图

分布在花篮螺栓连接处及中心轴连接部位。此外，中心轴在花篮螺栓连接节点和横梁接合处表现出较高应力，钢拉杆与花篮螺栓则主要承受拉应力作用。立柱在承受一定变形之后，由钢拉杆起到变形进一步扩大的作用。不同工况下的应力峰值变化趋势表明，随着载荷增大或倾角改变，关键部位的应力水平呈现规律性增长。

在下组图表(图 16~19)中展示了不同条件下主要部件关键连接点在不同索力下的应力变化情况。图表分别展示了在不同负载(40 kN、80 kN、120 kN)下，几种关键部件的力学性能表现。

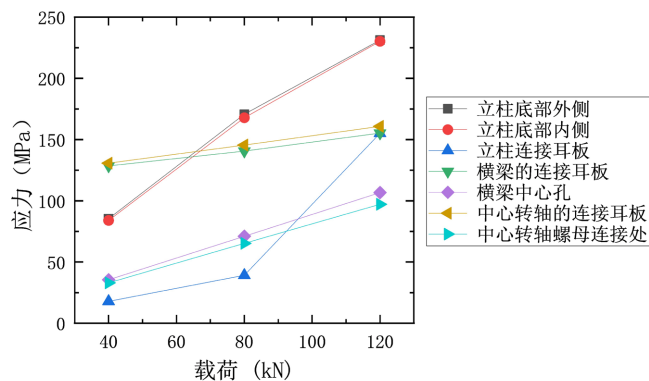


Figure 16. Load-stress relationship diagram (15°)
图 16. 载荷与应力关系图(15°)

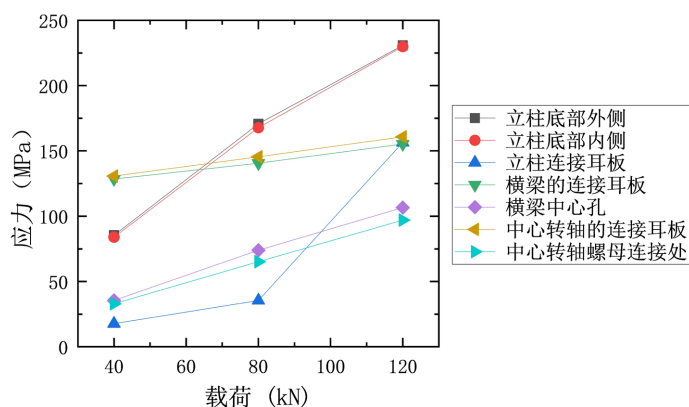


Figure 17. Load-stress relationship diagram (25°)

图 17. 载荷与应力关系图(角度 25°)

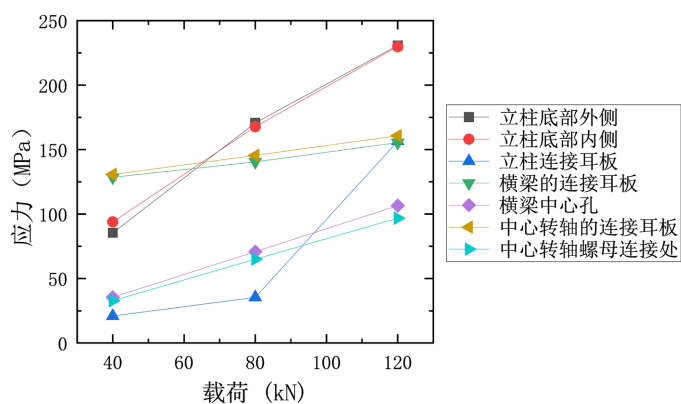


Figure 18. Load-stress relationship diagram (35°)

图 18. 载荷与应力关系图(角度 35°)

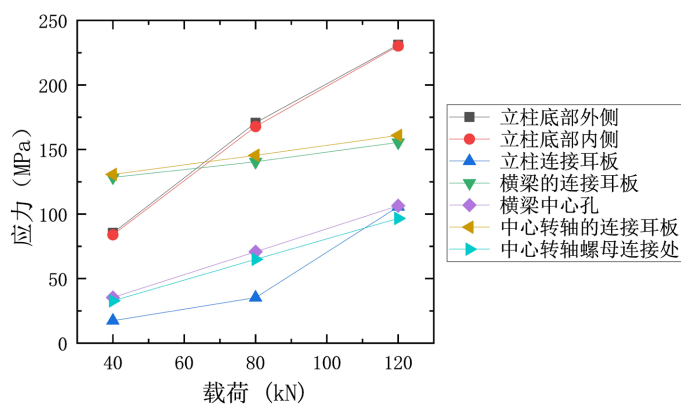


Figure 19. Load-stress relationship diagram (45°)

图 19. 载荷与应力关系图(角度 45°)

首先，图表中的横轴表示每根钢索的负载(单位为 kN)，纵轴表示应力的数值(单位：MPa)。不同颜色的曲线代表了不同的部件，具体包括立柱底部外侧、立柱底部内侧、立柱连接耳板、横梁的连接耳板、横梁中心孔、中心轴的连接耳板和螺母连接处等。

从图表中可以看出，随着负载的增加，各个部件的应力也在增加。不同的是，横梁与中心轴的应力

值的增加相对一致且平缓,可以更好地分析和预估更高载荷下的应力值。

但是立柱底部外侧和立柱连接耳板,在这些负载下表现出较高的应力值,随着载荷的增加应力值变化更明显,尤其是立柱上的连接耳板,载荷从 40 kN 增加到 80 kN 时,应力值变化率为 118.8%,但载荷从 80 kN 增加到 120 kN 时,应力值变化率为 296.2%,表明立柱在结构中承受了较大的力学负荷,主要原因是在 80 kN 及以下时,主要有立柱承受载荷,超过 80 kN,负载由立柱上的连接耳板传递到钢拉杆上,使钢拉杆开始分担载荷,而作为立柱和钢拉杆的连接部分会受到较大的应力,在实际工程应用中因着重注意连接耳板的强度问题。相比之下,通过采用花篮螺栓结构连接横梁与中心轴,横梁中心孔和中心轴的连接耳板的应力相对较低,表明结构分担了一部分载荷。

通过对比分析可以更好地理解和预测在不同工况下各个部件的力学表现,为结构优化和设计改进提供有力的数据支持。这些数据提供了详细的力学性能数据,有助于我们在机械设计和工程应用中做出更为科学和合理的决策。

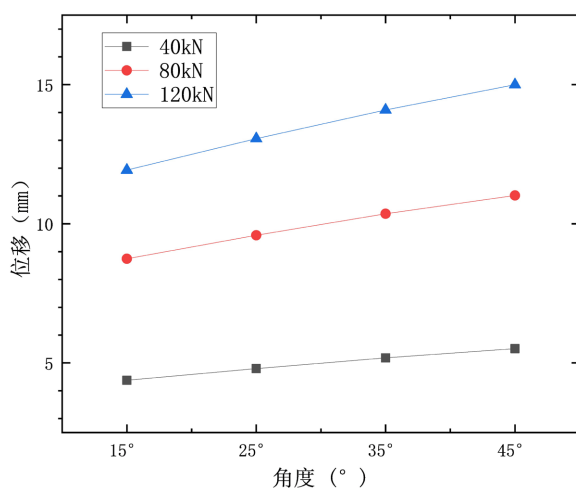


Figure 20. The relationship between the displacement at the top of the column and the angle

图 20. 立柱顶端位移与横梁翻转角度关系图

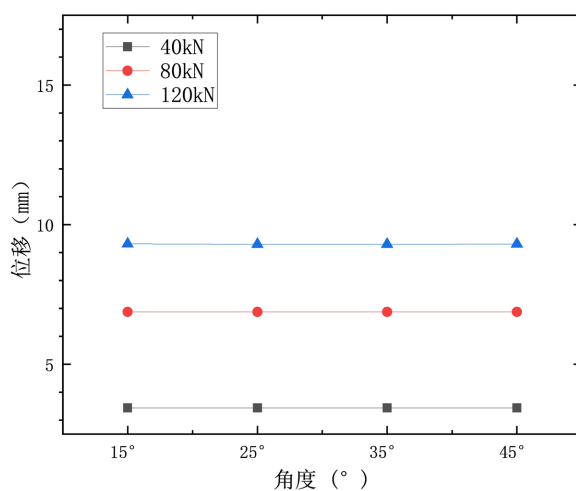


Figure 21. The relationship between the displacement at the end of the beam and the angle

图 21. 横梁端部位移与横梁翻转角度关系图

横梁所受载荷为 4 个钢索的合力, 发生位移的主要部位主要集中于立柱的顶端和横梁的端部, 图 20 和图 21 展示了不同载荷(40 kN、80 kN、120 kN)及横梁倾角(15°、25°、35°、45°)工况下的位移变化规律。分析显示, 横梁倾角的变化对立柱顶端位移的影响较小, 其最大位移波动范围仅为 1 mm, 表明立柱刚度较高, 稳定性良好。然而, 横梁端部位移受载荷变化影响显著, 在相同倾角下, 随着每根钢索的拉力从 10 kN 增至 30 kN, 横梁端部位移增大了 5 mm。此外, 当横梁倾角从 15° 增至 45° 时, 端部位移没有影响。值得注意的是, 横梁端部的过大位移会导致钢索索力分布改变, 可能影响结构的整体稳定性。因此, 在实际工程中需重点关注横梁刚度设计, 以确保在极端工况下位移控制在允许范围内。

4. 发电量仿真对比

天津地区固定式光伏角度有约 10° 和 35° 两种, 基于 PVsyst 7.4.4 仿真平台, 采用 Meteonorm 8.1 气象站数据对跟踪式柔性光伏系统(图 22)与同样容量(总容量 6.6 kW)和布局的 10° 和 35° (图 23)固定式光伏系统进行了全年发电性能对比研究。光伏板型号采用 LONGI LR5-72HBD-550M。数据结果显示(图 24~27), 跟踪式柔性光伏系统通过实时调整光伏板倾角的优化设计, 其性能指标显著优于固定式系统。



Figure 22. The Tracking flexible photovoltaic system
图 22. 跟踪式柔性光伏系统



Figure 23. A certain photovoltaic system in Tianjin (35°)
图 23. 天津某光伏系统(35°)

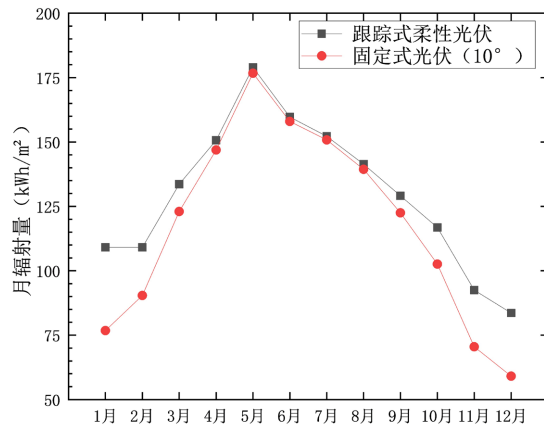


Figure 24. Comparison of monthly radiation variation trends between fixed (10°) and tracking types
图 24. 固定式(10°)与跟踪式每月辐射量变化趋势对比

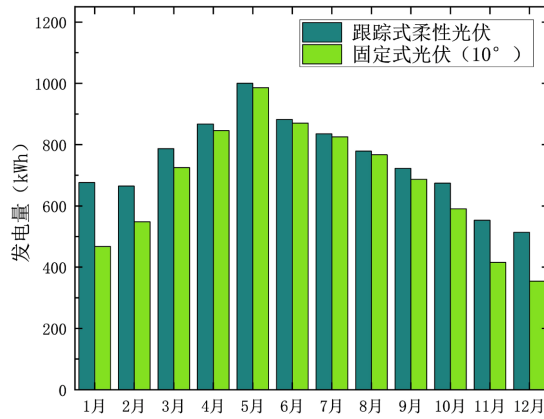


Figure 25. Comparison of monthly power generation trends between fixed type (10°) and tracking type
图 25. 固定式(10°)与跟踪式每月发电量变化趋势对比

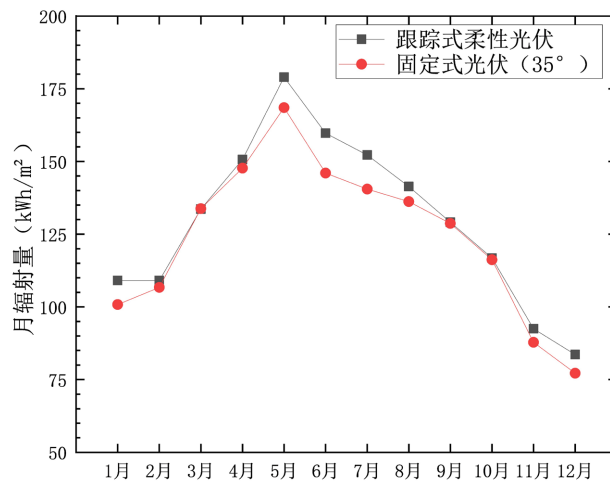


Figure 26. Comparison of monthly radiation variation trends between fixed (35°) and tracking types
图 26. 固定式(35°)与跟踪式每月辐射量变化趋势对比

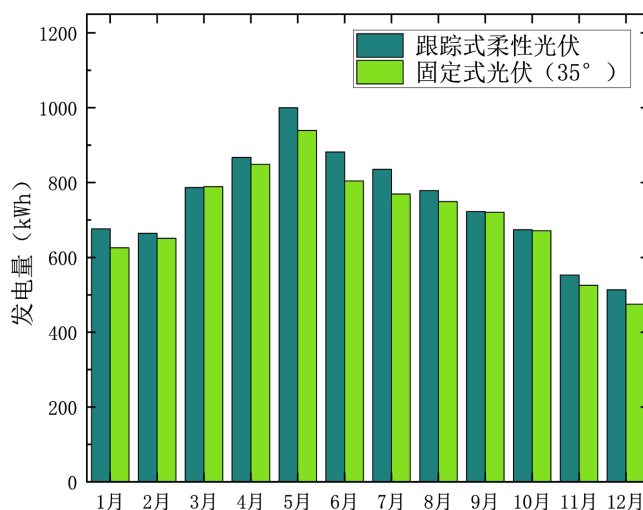


Figure 27. Comparison of monthly power generation trends between fixed type (35°) and tracking type

图 27. 固定式(35°)与跟踪式每月发电量变化趋势对比

具体而言:

1) 跟踪式柔性光伏支架入射采光面全年总辐射量 1556.8 kWh/m², 平均月辐射量 129.7 kWh/m², 全年发电量 8954.1 kWh;

2) 10°固定式光伏全年总辐射量 1416.8 kWh/m², 平均月辐射量 118.07 kWh/m²;

3) 35°固定式光伏全年总辐射量 1490.1 kWh/m², 平均月辐射量 124.18 kWh/m²。

在太阳辐射接收方面:

1) 跟踪式柔性光伏与 10°固定式光伏(主要应用在停车棚棚顶或厂房房顶)相比, 跟踪式系统单月最大辐射增益出现在 1 月份, 达到 42.06%, 全年平均每月辐射接收量每平方米提升 14.21%, 全年总辐射接收量每平米提高 9.88%。

2) 跟踪式柔性光伏与 35°固定式光伏相比, 跟踪式系统单月最大辐射增益出现在 5 月份, 达到 9.38%, 全年平均每月辐射接收量每平米提升 4.55%, 全年总辐射接收量每平米提升 4.5%。

在发电性能方面:

跟踪式系统单月最大发电量提升 9.69%, 全年累计发电量达到 8954.1 kWh, 较 10°固定式系统增加 871.9 kWh, 相当于提升了 10.79%的年发电量。较 35°固定式系统增加 385.6 kWh, 相当于提升了 4.5%的年发电量。这种性能提升主要得益于跟踪系统对太阳高度角变化的动态响应能力。同时通过数据对比发现, 跟踪式光伏和固定式光伏的在总辐射量 3 月和 9 月份时几乎相同, 是因为天津地区固定式光伏普遍设置成 35°, 跟踪式光伏的角度在这两个月与固定式光伏趋于一致。

5. 结论

5.1. 主要结论

本研究针对传统光伏支架系统存在的结构局限性, 提出了一种融合柔性结构与主动跟踪功能的创新设计方案, 通过结构优化与机电一体化集成, 实现了光伏支架大跨度与高发电效率的协同提升。主要结论如下:

1) 跟踪式柔性光伏支架系统比固定式光伏支架系统的发电效率高。

2) 通过制造成本转移(将柔性光伏支架节省的制造成本用在增加翻转机构和动力上), 使跟踪式柔性光伏支架拥有更好的地区和地形适应性、更好的发电效率。提出的跟踪式柔性光伏支架系统通过翻转机构与蜗轮蜗杆驱动系统的协同设计, 有效解决了柔性索结构与角度调节功能的兼容性问题。有限元分析表明, 在 120 kN 索力与 45°倾角工况下, 关键连接部位最大应力为 235 MPa, 低于 Q355 钢材屈服强度, 验证了结构的可靠性。

3) 本文通过实验验证与有限元分析, 系统性地提出了适用于柔性光伏支架的翻转及传动机构创新设计方案, 为后续研究提供了可借鉴的技术路径。具体贡献包括: (1) 采用横梁-中心旋转轴复合结构, 配合推力轴承与深沟球轴承组合设计, 有效克服钢索预紧力(最高达 120 kN)产生的轴向载荷, 使转动机构所需驱动扭矩大幅降低; (2) 创新性引入花篮螺栓调节系统, 通过预应力钢拉杆形成空间桁架效应, 将横梁端部位移控制在合理的范围之内; (3) 采用贯通式传动轴同步系统, 通过齿轮齿条副实现多跨横梁的角度同步; (4) 开发了基于空心轴结构的轻量化横梁, 在降低自重 23%的情况下仍满足强度要求。这些创新设计为柔性光伏支架实现可靠跟踪功能提供了关键技术支撑, 相关结构优化方法可扩展应用于其他大跨度可调结构领域。

4) 通过分析对比, 在相同的静力作用下, 横梁的翻转角度对柔性光伏支架整体的载荷和变形作用影响很小。应力和位移随载荷的增大而增大, 其中立柱顶端的位移变化很小, 但横梁端部位移受载荷变化影响最显著。

5) 本研究基于 PVsyst 7.4.4 仿真平台和 MeteoNorm 8.1 气象数据, 对天津地区跟踪式柔性光伏系统与 10°和 35°固定式光伏系统的接收辐射量和发电性能进行了对比分析。结果表明, 跟踪式系统通过动态调整光伏板倾角, 显著提升了太阳辐射接收效率和发电量。与 10°固定式系统相比, 跟踪式系统全年总辐射接收量提高 9.88%, 年发电量提升 10.79%; 与 35°固定式系统相比, 全年总辐射接收量提升 4.48%, 年发电量提升 4.5%。其中, 与 10°固定式系统相比, 单月最大辐射增益分别出现在 1 月(42.06%), 与 35°固定式系统相比, 单月最大辐射增益分别出现在 5 月(9.38%)。此外, 跟踪式系统在 3 月和 9 月时的动态调整角度与 35°固定倾角趋于一致, 两种系统在这两个月时辐射接收量基本相当。研究证明, 跟踪式柔性光伏系统通过全年跨度优化采光角度, 能够更高效地利用太阳辐射资源, 尤其适用于天津等中纬度地区, 可为光伏系统设计提供重要参考。

5.2. 未来研究方向

后续研究将着重解决以下问题: 本柔性光伏支架结构设计偏于保守, 可以进行横梁和立柱的结构截面优化、减少用钢量; 对主要部件的连接点进行结构强化和优化, 充分各连接点及连接杆件的作用, 从而保证实现光伏支架的整体稳定性的同时制造降低成本。

本研究为光伏支架系统的技术革新提供了理论依据与实践路径, 对推动新能源装备的智能化与高效化发展具有积极意义。

参考文献

- [1] 管迎春, 郭子臣, 陈效, 等. 水面光伏超大跨支架结构设计及技术应用分析[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(17): 121-124.
- [2] 李成志. 柔性光伏支架系统构造设计与工程应用[J]. 建筑技术, 2021, 52(9): 1120-1122.
- [3] 张东栋, 范信凌, 张斌, 等. 山地柔性光伏支架设计方案与施工工艺[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(10): 22-24.
- [4] 闭尚东. 柔性光伏支架在大坡度地貌条件的应用[J]. 红水河, 2023, 42(4): 61-64.
- [5] Hammad, B., Al-Sardeah, A., Al-Abed, M., Nijmeh, S. and Al-Ghandoor, A. (2017) Performance and Economic Comparison of Fixed and Tracking Photovoltaic Systems in Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **80**, 827-

839. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.241>

- [6] 黄宁. 固定式和跟踪式分布式光伏发电经济对比分析[J]. 中关村, 2024(2): 100-101.
- [7] 余俊杰, 苏中元, 史金林, 等. 一种固定式和跟踪式光伏阵列功率的估算模型[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 469-474.
- [8] Huld, T., Cebecauer, T., Šúri, M. and Dunlop, E.D. (2010) Analysis of One-axis Tracking Strategies for PV Systems in Europe. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **18**, 183-194. <https://doi.org/10.1002/pip.948>
- [9] 蔡凌飞, 朱卫兵, 汪秒. 浅谈柔性光伏支架的应用[J]. 工程建设与设计, 2024(11): 108-110.
- [10] 李立, 吴林, 文红晏, 等. 大坡度斜坡光伏支架设计应用分析[J]. 能源与节能, 2021(3): 202-204.