

# 中东地区大型光伏电站光伏跟踪支架技术研究及应用

程振东

中国能源建设集团广东火电工程有限公司 广东 510735

**【摘要】**：在全球能源格局转型背景下，中东地区作为大规模光伏电站建设重点区域，在运行中光伏跟踪支架技术应用重要性不容忽视，只有结合中东地区大规模光伏电站建设需求，深入分析强风、高温和复杂地质条件下光伏跟踪支架技术优化路径，才能够从根本上提升大型光伏电站运行效率奠定基础。鉴于此，文章先对中东极端环境下大型光伏电站跟踪支架技术应用挑战进行了简要分析，在探讨中东地区大型光伏电站光伏跟踪支架关键技术优化策略基础上，以沙特哈登 2.0GW 项目为例，探讨了光伏跟踪支架技术应用路径，以供参考。

**【关键词】**：中东地区；大型光伏电站；光伏跟踪支架技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.068

## 引言

大型光伏电站采用单轴跟踪支架系统，是光资源富集地区主流技术，中东地区年平均日照时间超过 3000h，总辐射强度超过 2000 度/m<sup>2</sup>，具有构建超大型光伏电站的天然优势。然而，传统跟踪支架技术大多基于常规风压和地质条件进行设计，在面对中东大风、高温、沙尘和砂质土壤等复杂极端环境时，其结构稳定性、运行可靠性和施工适应性均存在明显局限性。因此，开展面向中东地区特殊环境的光伏跟踪支架技术研究，对保证大型电站全寿命周期安全、高效运行具有重要意义。

## 1 中东极端环境下大型光伏电站跟踪支架技术应用挑战

### 1.1 极端气候与地质条件的复合挑战

中东地区大型光伏电站大多位于沙漠腹地，环境参数超出设计要求，如沙特哈登地区夏季地表最高温度可达 65℃，持续的高温会加速材料老化和结构应力松弛，同时也会对设备运行产生较大影响<sup>[1]</sup>。阵风最大风速为 28m/s，对应最大风压 0.85kN/m<sup>2</sup>，较国内基准风压 0.55kN/m<sup>2</sup>高出 50%以上，对支架抗倾覆能力提出严峻考验。另外，每年沙尘天气多达 20d 以上，风沙侵蚀和积尘覆盖的双重作用会导致部件效率下降和机械磨损风险增大，场区地质条件主要为砂质土层，地基承载力仅为 122kPa，施工难度大、工期长、造价高且强风荷载下砂土易发生液化沉降，进一步加剧支架地基不稳定性，气候和地质条件的叠加作用，使大型光伏电站对环境适应能力要求远高于常规地区。

### 1.2 传统光伏跟踪支架结构稳定性不足

传统平面单轴式跟踪支架采用 114mm 扭力钻杆，配以单点传动的回转减速装置，设计抗风压小于 0.6kN/m<sup>2</sup>，支架弯曲变形概率高达 8%，存在扭转失效和整体倾覆风险，难以满足

大型电站结构安全性要求<sup>[2]</sup>。同时，单驱动方式在大跨径支架上容易出现同步偏差，造成构件受力不均匀和跟踪精度降低。同时传统支架没有预留集成的线缆固定接口，导致组件旋转时线缆卷绕磨损严重，轴承座和连接节点为非拆卸式或螺栓密集式连接，单次维修时间长达 2h 以上，零部件数量巨大，难以控制装配误差，稳定性和运行维护缺陷将直接放大为系统风险，需要有针对性的技术优化来实现突破。

## 2 中东地区大型光伏电站光伏跟踪支架关键技术优化

位于沙特麦加省塔伊夫市东南方 78km 处的哈登 2.0GW 占地面积 48.1km<sup>2</sup>，采用全球最先进 N 型双面光伏组件 378 万片，配有 3.2 万套串平单轴自动跟踪支架。该电站由光伏阵列、清扫机器人系统、33 千伏线路、110 千伏/33 千伏升压站、集中控制中心等配套工程组成。本项目作为沙特“2030 远景”新能源规划的重要内容，预期在未来 25 年内总发电量达 1561.89 亿千瓦时，可减少近 1.47 亿吨二氧化碳排放，对于推动沙特能源结构转型、实现绿色低碳发展具有重要意义<sup>[3]</sup>。

### 2.1 优化高抗风稳定性结构体系

高抗风荷载是沙漠光伏电站跟踪支架安全运行的基础，在强风荷载下，若支架扭矩管和桩基础构成主要传力路径存在刚度不足或连接薄弱缺陷，易诱发结构共振和疲劳破坏，最终导致结构破坏<sup>[4]</sup>。因此从桩基础承载力、扭矩管件刚度、驱动同步性和结构阻尼出发增强其抗风能力，建立适用于极端大风环境的高可靠结构体系至关重要。

沙特哈登工程实际风压为 0.85kN/m<sup>2</sup>，可采用直径大于 148mm、沉桩深度大于 2.2m（最大深度为 2.9m）钢桩，单桩竖向承载力 80kN，水平承载力约 20kN，精准匹配砂质土壤实际荷载需求。上部结构采用 Skyline II 系列多点传动支架，配

有主传动和五个从动相结合的同步多点驱动回转减速机,主转矩管可升级为直径166mm、壁厚2.3mm,承载力提升至1.0kN/m<sup>2</sup>。转矩管支撑安装轨道和光伏组件,在南北两个方向上布置,利用机械转动驱动装置实现组件±60度角旋转,周边支架上安装减震装置,耗散风力振动能量,所有金属零件均经热镀锌处理,平均镀锌层厚度大于110 μm,保证设计使用寿命和耐腐蚀能力。

## 2.2 升级全生命周期智能运维技术

大型光伏电站覆盖范围广、设备多,全生命周期智能维护技术是将感知监测前置化、故障响应自动化和维修作业模块化,使维修工作从事后应急处理向事前预防转变,以缩短停机时间、降低全周期费用,延长设备使用寿命。

这一过程中应在檩条上增设电缆固定孔,增强整体线缆固定功能,减少线路损耗和故障率。在支架两端安装倾斜仪,将响应时间控制在0.3秒以内,当同步误差超过8°时将触发警报,超过10°将自动停机,以保证支架在最短的时间内完成自保护。采用新的可拆式轴承座设计,维修时不需拆卸整体结构,单次更换时间从2h缩短到0.4h,运行费用降低70%以上。同时可增加电机和轴承限位保护,加装传感器,对转角的智能控制,保证光伏组件在±60°角的匀速旋转,避免过载。最后需推行模块化设计,简化原连接节点及受力构件、减少螺栓、垫片等小型零件的数量,采用高强度集成连接件及可调结构,对轴承座等部件进行标准化预制组装,实现工厂生产和现场快速组装,整体安装效率比以往大型光伏工程提高27%以上。

## 2.3 支架与清扫机器人一体化协同设计

中东沙漠地区每年沙尘天气较多,光伏组件表面积尘严重限制了其发电效率,支架与清扫机器人协同设计关键在于消除支架结构与清扫装备间物理界面壁垒,采用柔性转换、快速锁固、无工具固持等技术,实现机器人串间的安全高效运行<sup>[5]</sup>。

停机位设计采用可调可动支架结构,利用弹性关节和伸缩支架组件实现与组件端面的柔性对接,实现停机位与机器人运行轨迹的自然衔接,保证起停和清扫切换过程平稳过渡。桥架采用轻质铝合金构架,配有高强度防滑表面,设有便于安装和后期维修的快速锁定机构,并设有位置传感器和限位保护装置,当支架没有完全到位时,会自动阻止清扫程序启动。组件固定时需创新提出无栓式Binder固定结构,利用自锁卡紧原理,采用夹具本体弹性变形和限位设计,无需附加工具或螺纹即可实现一按即锁的快速安装。本产品采用高强度的锌-镁铝复合材料,经过防腐处理,能自动补偿因温度变化而产生的微小变形,采用串联式固定连接方式同步优化清扫路径,减小越障阻碍,与传统栓接方式相比单点安装时间可减少67%以上。

## 3 中东地区大型光伏电站光伏跟踪支架技术应用

### 3.1 高抗风稳定性结构体系的工程落地应用

大型荒漠光伏电站抗风稳定结构体系工程落地是保障其安全运行的基础性工作,其实施涉及地质适应、桩基选择、上部结构装配和传动系统调试等多个工序协同工作。本项目提出从地基到上部结构的完整传力路径,要求各环节精确匹配极端风载和砂质地质条件,保证结构在全寿命周期内保持设计刚度。

在沙特哈登工程实施过程中,针对场区砂质土层和0.85kN/m<sup>2</sup>的高风压环境,先对现场100个测点进行土样采集和力学测试,确定平均承载力为122kPa。本项目拟采用理论模拟和现场试验相结合的方法,在桩基施工过程中选择直径大于148mm、壁厚大于2.2mm的钢桩,沉桩深度从2.2m到2.9m,单桩竖向承载力为80kN,水平承载力为20kN,施工效率较混凝土灌注桩大幅提升。上部支架采用Skyline II型串联多点传动系统,主扭矩管采用直径166mm、壁厚2.3mm的两种规格,沿东西向大跨度布置,南北方向分别布置安装轨道和组件。该驱动系统采用一台主动驱动和五台从式回转减速机相结合的方式,采用工业以太网和无线通信方式,实现集中-分布式控制,部件跟踪控制将天文算法和倾角传感器闭环控制相结合,实现对太阳的精确跟踪。根据风洞试验数据对周边支架节点加设阻尼器,钢构件热镀锌层厚度不得小于110 μm,该体系整体抗风能力比传统方案提高3倍,承载力达到1.0kN/m<sup>2</sup>,能满足电站25年设计年限内结构安全性和耐蚀性要求。

### 3.2 全生命周期智能运维技术的现场运行应用

本项目提出一种基于故障预知和结构性维修设计的新方法,将传统的被动抢修转变为主动预防,缩短非计划停工期,提高大型电站长期运行的经济性和可靠性。

在哈登项目现场,支架安装与智能运维技术同步进行,檩条制作中需预留线缆固定孔位,将线缆和支架结构一体化,完全消除因组件旋转而导致线缆缠绕的风险。每一个支架东西两端都安装倾角传感器,用来实时对比旋转角度的偏差,控制时间不超过0.3s,如果一次同步误差大于8°就会发出声光警报,超过10°就会自动切断电机电源实现停机保护。所有轴承座都是新的可拆卸结构,在现场维修时只要松开锁紧机构就可以进行更换,不需要拆卸转矩管或总成,一次更换工作时间由原来的2h缩短到0.4h。马达及回转机构增加机械及电子双重限制,以保证总成在±60°限制内匀速转动,避免突然停止冲击。零部件的供应采用模块化装配方式,轴承座、连接件等在工厂标准化装配,现场快速拼接,减少了约1000个小型零件。项目运行以来,监测数据表明线缆破损率从5%下降到0.05%,

支架同步偏差率降低到 0.5%，运行费用降低 70%以上，实现支架体系和运维设备的高效协同。

### 3.3 支架与清扫机器人一体化协同应用

支架与清扫机器人协同应用是提高荒漠光伏电站发电支持能力的重要途径，本项目采用结构接口标准化和运行轨迹适配，将固定支架系统和移动式清洗装备形成有机整体，重点解决固定支架系统与移动式清洗装备之间的对接精度、交叉作业连续性和部件固定可靠度等工程界面难题，实现两者之间的互不干涉和高效协同。

在“哈登”项目中，项目组与仁洁智能公司合作，根据电站场地特点和支架结构特点，开展量身定制，停机位采用可调式活动桥架结构，桥架通过弹性接头和可伸缩支撑组件实现组件端部柔性对接，采用轻质铝合金框架和高强度防滑层、承载力好、耐腐蚀性好。桥臂和机器人系统安装有位置传感器和限位保护装置，当支架未完全到位时，自动阻断清扫程序的启动避免了误动。在组件边框上完全采用了全新无栓式 Binder 固定结构，利用卡具本体的弹性变形和限位设计，施工人员只需按一下就能完成定位和卡合，不需要额外的工具。本产品选用

高强度的锌-镁铝复合材料，表面经过防腐处理，在工作过程中能自动补偿温度变化引起的变形，从而保证长期稳定的夹持力。采用固定连接的方式优化清扫路径，减小了越障坡度阻碍，使机器人跨行作业顺利连续。全厂约 746 万个固定点的安装工效从原来的每人每天 300 台提高到每人每天 500 台，单点安装时间减少了 67%，本项目实施使机器人运行迟滞趋近于 0，为电站每日高效率清扫和连续满发提供可靠的结构性保证。

## 4 结语

综上所述，中东地区大规模光伏跟踪支架技术的研发和应用，经过抗风稳定结构体系、全生命周期智能运维技术和支架-清扫机器人协同设计等系统集成，完成全链条技术验证。中东地区大型光伏电站光伏跟踪支架技术的应用，不仅可为极端荒漠环境下的光伏发电建设提供实践案例，而且可采用模块化前置化和建造过程的标准化，大幅提高大型电站的建造效率和长期运行可靠性。在推广应用时，要注意地质调查的精度和气象资料的完备性，保证构造参数与场地条件的精确匹配，强化运维人员技术培训，发挥智能监控系统预警效能，不断优化支架和清扫装备协同工作策略，确保电站全寿命周期安全稳定高效发电。

## 参考文献:

- [1] 唐竹,李彭真.集中式光伏电站的跟踪支架安装技术应用[J].电力设备管理,2026(6):223-225.
- [2] 石帅岭,刘建昌.大型光伏项目跟踪支架系统联合调试研究[J].消费电子,2026(6):137-139.
- [3] 翟梦娴.基于遗传算法的光伏电站太阳光智能跟踪控制研究[J].绿色科技,2026,28(4):176-181.
- [4] 魏健.跟踪支架在集中式光伏电站中的发电增益效果[J].建筑与施工,2025,4(23):52-53.
- [5] 王钊.探析人工智能跟踪算法在渔光互补光伏电站的首次运用[J].水电与新能源,2024,38(2):17-20,24.