

《光伏柔性支架系统设计规程》 编制说明

团体标准编制工作组

二〇二四年五月

1. 项目背景

1.1 任务来源

目前，我国的化石能源供应日益紧张，其消耗所造成的环境污染问题越来越严峻。2020 年 9 月，国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布中国二氧化碳排放量力争在 2030 年前达到峰值，并且力争 2060 年之前可以实现碳中和，“3060”战略已经上升成为我国的国家战略，开发利用可再生资源已经迫在眉睫。太阳能作为一种可再生能源，备受世界各国关注，我国大陆各地区太阳能年辐射量最大值为 8364 MJ/m^2 ，最小值为 3324 MJ/m^2 ，均值为 5749 MJ/m^2 。太阳能资源年辐射总量约 $5 \times 10^{16} \text{ MJ}$ ，相当于 2.4×10^4 亿 t 煤。丰富的太阳能资源为我国开发利用太阳能创造有利条件，光伏发电是当今开发利用太阳能资源的最有效形式之一，对人类而言，太阳能是一种取之不尽、用之不竭的能源。我国属于太阳能资源丰富的大国，全国有 $2/3$ 的地区年辐射量在 5000 MJ/m^2 以上，合理有效开发太阳能资源已成为现阶段我国解决能源危机、缓解气候变化的重要途经。随着我国“碳中和”目标的提出，太阳能光伏发电日益成为实现我国“双碳”目标的重要途径，然而随着当前光伏电站发展的不断推进，平整、开阔的土地资源越来越少。在这种形势下，我国对光伏电站的建设标准提出了更高的要求，尤其是在土地的高效复合利用方面。目前市面上常用的固定式光伏支架对地形平整度要求较高，地形适应性较差；漂浮式光伏支架则需要占用开阔的水面，易受外界政策的影响；平单轴光伏支架适用的场景较少，并不适用于地形起伏且场地地基变化大的复杂地区。

以往光伏电站开发更偏重于光，而忽视了对农、渔业的关注，柔性支架技术具备高效土地复合利用的特性，近些年来得到工程界的广泛关注。柔性光伏支架通过在两个支撑间张拉预应力钢绞线，光伏板所受荷载传递到钢绞线上，支撑固定于刚性基础上，通过斜撑保持支撑稳定，可实现较大范围内的跨距调整。由于中间钢支架用量减少且柔性支架一般跨度较大，使整体支架用钢量降低、基础数量减少，降低了造价；其高净空、大跨度的特点，可适应多种地貌特征，大大增加了光伏电站可开发利用面积，实现土地的综合利用。目前市场上柔性支架结构体系可分为单层悬索体系、双层索系（承重索+稳定索）以及更为复杂的反向张

拉防风索网结构；预应力索网、混合体系、张弦（梁、桁架）+索拱、弦支穹顶、横向加筋等几种结构。主流的预应力悬索柔性支架结构型式包含承重索、稳定索、桩柱、边锚系统、钢梁、索桁架撑杆等关键部分。目前市面上各厂家的光伏柔性支架方案参差不齐，如何对光伏柔性支架这种新的技术产品进行安全可靠的设计是当前亟待解决的问题。

1.2 前期工作

为推进本规程编制工作，承担单位成立了标准编制组，组建了咨询专家组。标准编制组系统总结前期工作，并在调查研究分析我国光伏柔性支架发展现状的基础上，确定了编制《光伏柔性支架系统设计规程》的基本思路和技术路线。具体工作包括：

（1）现有光伏柔性支架方案研究：调研多个光伏柔性支架电站，开展技术攻关，分析对比数十种设计方案，归纳总结当前光伏柔性支架设计的重难点，并对光伏柔性支架的设计计算方法进行了深入研究。

（2）针对当前柔性支架设计痛点进行深入研究：结合风洞试验及数值模拟针对市场上现有柔性支架方案存在的易产生风致振动和组件隐裂的痛难点提出可靠安全且经济的设计理念。

（3）形成设计规程文本草案：在深入分析研究的基础上，总结当前诸多光伏柔性支架电站的设计经验，形成《光伏柔性支架系统设计规程》（草案）。

2. 研究目的及意义

2.1 研究目的

国外有关柔性光伏支架的研究及应用最早可以追溯到 2008 年，但大部分只是小规模的应用，且目前尚未形成有关柔性支架的设计及安装标准。国内自 2021 年起，国电投、华能、国家能源、大唐、华电等新能源开发集团已开始在山地、渔光互补、污水处理厂等项目上大规模使用光伏柔性支架。诸多支架厂家也参与到柔性支架的研发过程中，有关柔性光伏支架的研究发展十分迅猛，通威、安泰科、中信博、品尚、光翔等支架厂家已形成自主研发的柔性支架产品，并在诸多渔光互补项目中进行应用。

由于柔性支架仍然处于技术逐步完善和行业标准修订阶段，市面上的柔性支架种类多样以及质量的参差不齐，价格变化区间大；加之柔性支架系统成本也与其连跨长度和净空高度有直接关系，导致柔性支架单瓦成本从 0.2 元/瓦~0.6 元/瓦变化都属于合理区间。目前柔性支架虽然已逐渐在鱼塘、污水处理厂、山地等特殊场所推广应用，但缺少有效的技术标准进行规范，严重制约了其发展应用。固定式支架、漂浮式光伏支架以及平单轴光伏支架等均有设计标准，但有关光伏柔性支架标准立项滞后。

光伏柔性支架作为新的技术产品，应用场景广泛，亟需基础技术标准规范光伏柔性支架设计及验收的要求，为柔性支架应用提供规范性指导。本标准将梳理光伏柔性支架力学特征，统一规范柔性支架的强度和安全标准，提出验收原则，解决行业内光伏柔性支架安全标准不统一的问题。

2.2 研究意义

通过本标准的编制，可规范光伏柔性支架设计和验收的要求，为光伏柔性支架应用提供规范性的指导，梳理光伏柔性支架的力学特征，统一规范柔性支架的强度和安全标准，提出施工安装和验收原则，解决行业内光伏柔性支架安全标准不统一的问题。为通威、安泰科、中信博、品尚、光翔等一批柔性支架厂家提供安全可靠的柔性支架设计标准。

且随着我国新能源蓬勃发展，平原、平坦山地资源愈发少见，光伏柔性支架可跨越复杂地形，适合鱼塘、复杂山地等，其应用项目逐步从千瓦级容量发展至兆瓦级容量；行业从谨慎尝试、示范实验向降低成本、规模应用转变，单个光伏柔性支架项目容量可达百兆瓦级别；但是由于缺少统一的标准，各单位产品设计安全标准不一致，存在安全隐患。通过本标准可改变当前光伏柔性支架设计过于保守的部分，在不降低其安全性的前提下，提高了其经济性，有利于当前光伏柔性支架在工程市场上的推广及应用。

通过本标准也可改变当前部分柔性支架厂家片面追求经济性，而不注重光伏柔性支架抗风动力稳定性的现状，引领整个光伏柔性支架行业更安全健康发展。柔性支架的推广应用，提高了光伏发电项目土地的综合利用率，实现阳光、土地资源的立体高效利用。光伏发电工程为可再生能源项目，属国家鼓励发展的新能源项目，不耗费能源资源，符合国家能源发展战略要求。工程建成后可改善电网

电源结构，有利于当地国民经济的可持续发展。也有利于当地劳动力市场和建材市场的繁荣，增加社会就业机会，可为地方财政带来较大的税收，有利于当地经济发展。

综上所述，本标准的推广应用将产生显著的经济效益和社会效益，应用发展前景将十分广阔，在国内乃至国际市场上均具有很强的影响力。

3. 主要研究内容

光伏柔性支架采用预应力索结构支撑光伏组件，是一种新兴的光伏支架形式，目前暂无相关规范标准，也没有成熟的结构力学分析技术，不利于光伏柔性支架的大面积推广应用。光伏柔性支架具有基础跨度大、净空高的优势，常常与农业、渔业互补开发，但光伏组件产生的阴影遮挡对农作物和渔业养殖产生的影响的研究成果较少，如何让“光伏+”真正形成“1+1>2”的效益是急需解决的问题。

3.1 光伏柔性支架结构型式研究

拟基于现有河道、水渠、污水处理厂、鱼塘等应用场景，针对部分无法打桩的水域，研究在不同跨度条件下光伏柔性支架端支座基础结构，优化支座受力形式；分析各种跨度下柔性光伏支架的抗风稳定结构，形成光伏方阵布置、整体刚度、振动频率和变形控制关键技术，最终开发形成不同跨度的光伏柔性支架产品，总结其相应的设计标准。

具体研究内容包括：调研现有光伏柔性支架专利和工程应用现状，按常规方案分析不同跨度对预张力索变形、张力、固有周期等因素开展敏感性分析；依据分析结果初步提出大跨度方案，分别对支座结构、组件排列、抗风结构等开展优化设计，在满足安全性前提下，减少工程量；对柔性支架方案的整体光伏电站开展优化布置，从阴影遮挡、电缆铺设等方面提高柔性支架光伏电站经济性。

3.2 光伏柔性支架风致气弹响应研究

开展光伏柔性支架风洞实验，分别开展测压实验和气弹实验；测压实验对光伏阵列不同风向作用在光伏组件上的压力进行测量，分析风荷载体型系数和动态效应；气弹模型实验研究在不同风速下，光伏柔性支架的振动响应情况，分析可能发生失稳破坏的风速，形成其相关动力设计标准。

3.3 光伏柔性支架与农渔业互补研究

基于光伏柔性支架下部空间大，结构物少的特点，调研现有光伏柔性支架与农作物和水产养殖的结合模式，对适应于光伏组件下方，光照需求较小的高附加值农渔业开展调研，初步筛选可与光伏电站结合的农作物与水产品种；对采用露天种植、大棚种植等种植方式，研究柔性光伏支架布置形式，既能保证光伏电站容量，也能保证种植面积；分析透光率对农业和渔业产量的影响，基于电站和农渔业养殖的经济性，提出最佳透光率范围；研究 LED 补光等技术，提高渔业和农业产量，并在设计标准中对其进行考虑。

4. 研究原则、实施方法和技术路线

4.1 拟采用的原则

本设计规程在制定过程中遵循以下原则：

（1）科学性原则

设计规程的构建，须体现科学性，既要参考国内外相关经验及国家政策要求，还要与当前光伏柔性支架的发展现状相关，有效引导光伏柔性支架设计标准的确立。

（2）整体性原则

有关光伏支架设计规程内容需足够全面，既能够反映当前光伏柔性支架整体的设计思路，又能够体现光伏柔性支架全过程设计的特点。

（3）定性定量相结合原则

当前柔性光伏支架的设计标准千差万别，为了更科学地规范柔性支架设计标准，关键的设计部位宜以量化指标为主，辅以定性分析。

（4）适时优化原则

考虑到当前光伏柔性支架的发展速度，本规程需适时进行更新和优化。

4.2 拟采用的方法

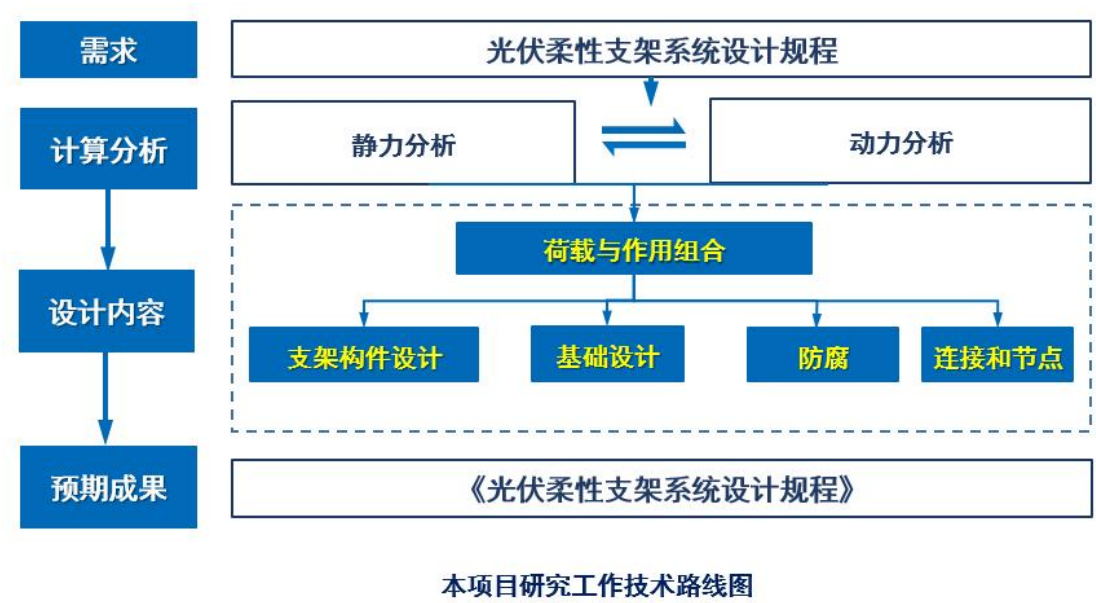
（1）现状调研与总结。通过资料收集、现场调研等方式，调研多个光伏柔性支架电站，分析对比数十种方案，归纳总结当前柔性支架设计的痛难点。

(2) 风洞试验验证。针对光伏柔性支架刚度较小，极易发生风振响应的特点，调研国内现有光伏柔性支架风洞实验相关资料，确定通过实验可获取的参数；依据边界层风洞实验室条件，建立物理缩尺刚性模型，开展光伏组件测压实验，研究风荷载分布情况，获取最大风荷载产生角度；建立光伏柔性支架气动弹性物理模型，通过风洞研究柔性支架失稳振动现象，形成其相关动力设计标准。

(3) 组织及参与项目相关会议和活动。按照项目实施进度，组织项目启动会、专题研讨会和柔性支架设计专题论坛等会议活动。

4.3 拟采用的技术路线

本规程编制拟采用的技术路线图如图 4-1 所示。



5. 与国内外相关标准关系分析

目前，国内外光伏柔性支架相关的代表性标准指南情况分析如下：

(一) 国外标准情况

本标准制定过程中，未检索到国际标准或国外先进标准，标准水平达到国内先进水平。

(二) 中国光伏行业协会团体标准-《光伏柔性支架设计与安装技术导则》

2022 年 9 月，由中国光伏行业协会团体标准《光伏柔性支架设计与安装技术导则》顺利通过会议预审，加快了柔性支架的技术化、标准化进程。此导则涵

盖了柔性支架设计规定、荷载和作用组合、结构体系、构件设计、连接和节点、支架基础设计、防腐、安装等多个方向，结合现有柔性支架行业等特点，因地制宜进行了编制工作，对柔性支架的设计及安装具有指导意义。该导则 2022 年 12 月 30 日正式发布，并于 2023 年 1 月 15 日开始实施，适用于新建、扩建或改建光伏发电系统的光伏柔性支架的设计与安装。但该导则主要由支架厂家牵头编写，更多侧重于经济成本进行考虑，设计标准偏低，安全风险较大，且所有跨度的柔性支架方案均采用相同的设计标准，存在明显的局限性。此外，目前市面上已有柔性支架方案采用此标准后仍导致风致破坏的案例。

（三）国家能源局行业标准-《光伏支架结构设计规程》

此标准主要针对传统固定光伏支架结构设计，使其能做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量。标准中的柔性支架是指支架节点具有一定的抵抗弯矩的能力，受力变形过程中梁柱夹角可能表现出一定的柔性反应特性。与市面上目前采用预应力钢绞线作为支撑的光伏柔性支架明显不同，设计标准并不适用，且未介绍适用于柔性光伏支架的施工安装方法。此规范中要求光伏支架结构设计时风荷载和雪荷载需同时考虑，另外风荷载设计所采用的基本风压不应低于 0.30kPa。光伏柔性支架同样属于光伏支架结构，此标准中的风雪荷载的计算、荷载组合、设计使用年限、构件设计等在对光伏柔性支架进行设计时同样具有一定的借鉴意义。

（四）住房和城乡建设部行业标准-《索结构技术规程》

此规程的主要技术内容包括索体与锚具；设计与分析；节点设计与构造；制作、安装及验收等，包括了索结构的定义、索结构形式、计算模型、索和锚具的材料及性能、各类节点的设计与构造要求、制作安装与验收。光伏柔性支架本质上相对于传统固定光伏支架最大区别在于把固定支架的檩条换成了柔性的索结构，因而本规程中索结构体系、索体与锚具、索结构的设计与分析等条文同样可供光伏柔性支架索结构设计时参考。但相对房建系统中的索结构，光伏柔性支架的设计所需的安全等级较低，若照搬此规程中的设计标准，设计将变得过于保守，导致整个光伏柔性支架结构系统的经济性变差，不利于其在市场上的推广及应用。

（五）交通运输部-《公路桥梁抗风设计规范》

本规范主要用于指导公路桥梁的抗风设计，吸纳了近年来国内外桥梁成熟的抗风设计经验和研究成果，采用了基于性能的设计思想以及以分项系数表达的极限状态设计方法。相比传统的固定支架而言，光伏柔性支架跨度更大，质量轻，刚度更弱，风振问题更为突出，需采取稳定的抗风措施，这也是柔性支架大面积推广应用于光伏电站将会遇到的一个重要障碍。本规范中针对大跨度桥梁的抗风设计方法在进行柔性支架抗风设计时同样有一定的借鉴意义。然而，桥梁的安全等级相较光伏支架而言要求更高，直接将其抗风设计标准应用在光伏柔性支架上同样会导致设计过于保守，经济性下降。

综上所述，国内外相关标准、指南与本标准都有实质性区别，均存在一定的局限性，未系统地进行协同、统筹考虑，但都为本标准的编制提供了参考和借鉴，其中《光伏柔性支架设计与安装技术导则》虽然设计标准偏低，但其在防腐方面为本标准提供了参考，《光伏支架结构设计规程》则为本标准中设计使用年限、荷载取值及组合、构件设计等提供了参考，《索结构技术规程》为本标准中索体与锚具、索结构的设计与分析等提供参考，《公路桥梁抗风设计规范》为本标准中抗风结构设计等提供参考。

6. 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准符合现有的法律、法规。

7. 重大分歧意见的处理经过和依据

目前暂没有分歧意见

8. 贯标的措施和建议

本标准团体标准，建议按照国家有关团体标准管理规定和中国科技产业促进会团体标准管理要求，在协会会员中推广采用本标准，鼓励社会各有关设计单位自愿采用该标准。

9. 废止现行有关标准的建议

无。

10. 其他应予说明的事项

无。

11. 进度安排

项目实施期限为 1.5 年，起止时间为 2023 年-2024 年。主要进度如下：

2023 年：

- (1) 项目实施方案编制。
- (2) 开展国内外光伏柔性支架电站设计方案及发展状况调研，包括离地高度、跨度及抗风措施等，全面梳理我国柔性光伏支架的潜力及发展趋势。
- (3) 开展光伏柔性支架设计方法研究，初步形成设计标准体系，明确相关计算方法。
- (4) 开展风洞试验，确定柔性光伏支架的动力控制标准。

2024 年：

- (1) 组织相关设计单位、支架生产厂家等进行内部探讨和征求意见，优化规程。
- (2) 选择小规模柔性支架项目，开展设计规程的应用。
- (3) 总结试点项目的设计经验，优化设计规程。
- (4) 召开专家研讨会、交流会，征求各方意见，提高成果质量。
- (5) 形成《光伏柔性支架系统设计规程》及其编制说明（建议稿），发布实施。

12. 规程框架设计

从标准适用范围、规范性引用文件、术语和定义、基本要求、柔性支架结构及基础设计、防腐等几个方面进行设计。具体内容见标准大纲，初步框架设计如

下：

1、范围

本文件规定了光伏柔性支架的术语和定义及符号、基本规定、荷载和作用组合、结构体系、构件设计、连接和节点、支架基础设计、防腐等。

本文件适用于新建、扩建或改建光伏发电系统的光伏柔性支架的设计。

2、规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款

3、术语

对于本标准中特定词的解释。

4、基本规定

5、设计

5.1 荷载与作用组合

风、雪、温度、地震等荷载计算方法以及荷载组合要求

5.2 构件设计

柔性支架上部索结构、钢结构、钢丝绳等选用材料、型号等要求

5.3 基础设计

对于锚桩、端立柱和中立柱采用钢结构、预制管桩、灌注桩等结构形式的设计要求

5.4 连接和节点

索和光伏组件连接节点、杆件与索连接节点、索与型钢连接节点、型钢与基础连接节点等关键部位采用螺栓、焊接等连接形式的设计要求

5.5 结构体系

针对柔性支架结构采用的理论方法、数值方法、实验方法给出相关要求，整体结构和局部结构分别考虑

5.6 防腐

支架和基础防腐相关要求

附录

需详细说明部分或索结构计算相关内容