

固定－柔性支架光伏阵列空间整体排列 与排间距优化方法研究

王若晨

大唐蒲城第二发电有限责任公司, 陕西 渭南 715501

DOI:10.61369/ME.2026010031

摘 要： 本研究系统性光伏阵列空间整体排列与排间距优化方法。该方法先利用高精度地形数据开展精细化分区，明确固定支架与柔性支架适用区域，结合 GIS 空间分析和三维建模技术进行阵列空间整体排列。综合考虑地形坡度、坡向、阴影、土地利用效率及农光互补需求来优化阵列朝向、倾角和布局形态。随后针对不同区域特点分别采用基于太阳轨迹和地形阴影的间距计算模型、考虑地形因素的间距动态调整模型，运用多目标优化算法（如遗传算法）对排间距进行精细化优化。以此最大化发电量、最小化土地占用和工程成本。希望本研究有助于克服单一支架技术局限性，显著提升山地光伏电站技术经济性和环境效益，为山地可再生能源资源可持续开发提供实用技术支撑体系。

关 键 词： 固定支架；柔性支架；山地光伏；空间排列；排间距优化

Research on the Spatial Overall Arrangement and Row Spacing Optimization Method of Fixed-Flexible Bracket Photovoltaic Arrays

Wang Ruochen

Datang Pucheng Second Power Generation Co., LTD., Weinan, Shaanxi 715501

Abstract： This study explores the spatial overall arrangement and row spacing optimization methods of systematic photovoltaic arrays. This method first uses high-precision terrain data to carry out fine zoning, clearly defines the applicable areas of fixed supports and flexible supports, and combines GIS spatial analysis and 3D modeling technology to conduct overall arrangement of the array space. The orientation, inclination and layout form of the array should be optimized by comprehensively considering the terrain slope, aspect, shadow, land use efficiency and the demand for agriphotovoltaic complementarity. Subsequently, in light of the characteristics of different regions, the spacing calculation models based on solar trajectories and terrain shadows, as well as the dynamic spacing adjustment models considering terrain factors, were respectively adopted. Multi-objective optimization algorithms (such as genetic algorithms) were used to conduct refined optimization of the row spacing. This maximizes power generation, minimizes land occupation and engineering costs. It is hoped that this research will help overcome the limitations of single support technology, significantly enhance the technical economy and environmental benefits of mountain photovoltaic power stations, and provide a practical technical support system for the sustainable development of mountain renewable energy resources.

Keywords： fixed bracket; flexible support; mountain photovoltaic; spatial arrangement; optimization of row spacing

前言

随着全球气候变化问题变得日益严峻，同时能源结构转型也在不断加速，可再生能源尤其是光伏发电正在经历前所未有的快速发展。山地地区凭借其广阔的非耕种土地资源，还有潜在的丰富光照条件，被视作未来光伏电站建设的重要潜力区域。然而山地地形通常呈现复杂多变的特点，包含显著的地形起伏、多变坡向、陡峭坡度以及破碎地块边界，这些因素共同构成山地光伏电站开发的技术壁垒。传统光伏电站开发模式尤其是在地形相对平坦区域，常采用标准化固定式支架系统来进行建设。其设计原理和施工方法在山地环境中面临严峻挑战，需要开展大规模土方工程来平整场地，这既破坏生态环境又显著增加成本。标准化的阵列排布难以适应多变的坡向和坡度，致使组件朝向和倾角无法优化，造成发电量损失严重。同时为了保证发电量往往需要设置较大的阵列间距，从而造成土地资源出现浪费情况。为此本研究提出并聚焦一种创新的“固定－柔性支架融合”技术体系，以实现山地光伏资源的高效、可持续开发。

作者简介：王若晨（1994.09-），男，汉族，陕西渭南人，本科，助理工程师，研究方向：新能源。

一、固定—柔性支架技术优势分析

以往,在山地环境里应用传统固定支架技术存在诸多技术挑战。例如,固定支架通常需要开展大规模土方工程,不但造成严重的土地扰动和生态破坏,增加水土流失风险,还大幅提高土建成本与施工难度。同时,固定支架组件朝向易受地形或相邻阵列阴影遮挡,造成发电量损失^[1]。而固定—柔性支架融合技术核心要点是巧妙解决山地地形适应性难题,通过对山地微地形开展科学识别分类精准确定不同支架最佳应用区,从而实现“因地制宜、优势互补”。例如,在坡度大且坡向变化剧烈以及土石方开挖成本高的区域优先采用柔性支架,像索杆式张力结构或带倾角调节功能的特殊固定支架。索杆式张力结构借助少量锚固点让组件贴合坡面,减少土方开挖,能很好地适应坡度大且起伏变化大的地形;带倾角调节功能的特殊固定支架可调节支撑腿使组件达到所需倾角,灵活应对复杂多变的坡向。除此之外,融合技术体系还涵盖电气设计优化,合理规划汇流箱与电缆敷设路径,以适应不同地形条件下的电气连接需求。这种模式有效解决了传统固定支架在山地地形适应性方面的不足,已成为山地光伏电站应对复杂地形挑战的关键技术路径。

二、光伏阵列空间整体排列方法

(一) 基础数据预处理

光伏阵列空间整体排列的准确性依靠基础数据的精度和完整性,在实施相关方法之前必须严格获取并预处理基础数据。数据的来源具有多样性,其中高精度地形数据是核心内容,可通过无人机倾斜摄影测量、LiDAR扫描或者专业测绘来获取,使其精度能够达到厘米级别,可精准呈现山地微小起伏和破碎边界^[2]。同时,所获取的原始DEM/DSM数据需要坐标统一、拼接、孔洞填充、噪声平滑等预处理操作,以此保证数据的连续性和一致性。此外还需要利用GIS软件或者专业算法精确提取地形因子,从而为后续的分区优化工作打下基础。值得注意,在这一过程中,需收集项目地多年平均太阳辐射(包含水平面总辐射等)、日照时数、关键月份太阳运行轨迹参数以及极端气象条件等内容,用于计算阴影、优化倾角以及评估系统可靠性。并识别禁建区和限建区后将所有数据整理归档,以便后续进行调用和分析。

(二) 基于GIS的阵列优化

地理信息系统(GIS)是用于光伏阵列空间整体排列优化的核心工具。在实际操作过程中,首先借助GIS空间分析功能并结合高精度地形数据,对固定—柔性支架区域开展精细化分区工作。可基于坡度、坡向等指标设定相应阈值和权重,采用叠置等多种分析方法生成分区图层。例如,坡度大于15°的区域设定为柔性支架优先区,小于10°且坡向变化小的区域为固定支架优先区,中间部分则划分为过渡区。通过分区结果直观显示在地图上可为阵列排列提供区域指导。其次,依据分区情况和太阳辐射数据对阵列朝向与初步倾角进行优化,在固定支架区结合坡度计算等效倾角或者根据最佳发电倾角反推基础高度变化以确定优化倾角范

围,在柔性支架区初步朝向沿着等高线或者主坡向,倾角依据调节能力和地形坡度来设定。此外,利用GIS叠加分析和可视化功能开展初步阴影分析,模拟太阳光线传播路径以识别阴影区域,为阵列布局避让提供依据,同时考虑“农光互补”情况叠加土地利用图预留农业空间,将其作为布局约束条件并用缓冲区分析设定最小安全距离^[3]。

(三) 三维建模下阵列布局设计

在完成GIS分区和初步优化以后,需采用三维建模技术对阵列布局开展精细化设计,这是达成阵列与复杂地形精确适配的关键所在。在实践过程中,可先导入或者创建光伏组件、固定及柔性支架(包含索杆或调节机构模型)的三维模型。按照GIS分区结果和初步朝向倾角建议,在三维视图当中手动或者半自动布置光伏阵列。此过程着重人机交互与视觉优化,可直观查看阵列排布是否顺应地形,是否满足通道、检修空间等方面的要求,以及是否与农光互补区域相互协调。比例,布置柔性支架阵列的时候,可模拟调整索预紧力或调节机构转角,观察组件面板贴合坡面情况以及与太阳入射角的偏差,布置固定支架阵列时,确定基础位置和标高,模拟土方工程并且评估其产生的影响。

三、排间距优化方法

(一) 太阳轨迹与地形阴影模型构建

排间距优化的核心要点是精确计算前后排最小安全距离,以此避免前排对后排形成过度遮挡,进而确保光伏系统能够获得充足的太阳辐射。其技术依据是太阳运行轨迹以及地形对阳光传播路径造成的影响。这一过程中,精确确定太阳位置是整个工作的基础,需依据项目所处的地理位置、具体日期和时间,运用球面三角学公式或NOAA算法计算太阳高度角和方位角。其中太阳高度角决定着阴影的长度,方位角则决定着阴影的投射方向。在理想的平坦地面上可使用经典公式计算最小排间距,然而,需要注意,在山地环境下因地形会产生额外阴影或者截断阴影,从而影响到后排的受光情况。需建立复合阴影计算模型,借助高精度数字高程模型(DEM)数据,利用GIS光线追踪算法或者专业软件的阴影分析模块,模拟特定日期和时间的太阳光线传播路径,以此判断后排是否被遮挡。

(二) 地形因素动态调整模型

按照标准太阳高度角和理想高差计算出来的排间距,很难直接在复杂山地环境当中使用,需要依据地形进行动态调整,以此来体现实际相对高差变化以及阴影路径的复杂性。考虑地形因素的排间距动态调整模型,其核心是对地形坡度、坡向以及局部特征给前后排实际相对高差(ΔH)和阴影投射路径带来的影响进行量化。在坡面布置阵列的时候,常规简化模型在复杂地形条件下往往并不够准确。建议,当前后排不在同一坡向或者存在转折的时候,运用矢量分析来计算实际有效高差和阴影长度。局部地形特征像凹陷、凸起等会对阴影传播叠加产生影响,需进行精细模拟修正。将模型和GIS坡度、坡向数据相结合,针对不同区域计算特定 ΔH 和阴影修正系数,将基于标准太阳轨迹的初始排间距

建议值，转化为适合复杂山地的精确合理设计值，为多目标优化算法提供准确输入和约束条件。

（三）多目标优化算法应用

阴影模型和动态调整模型所算出的排间距结果比较保守，难以在发电量、土地占用以及成本之间实现最优平衡，所以引入多目标优化算法。建议，应用遗传算法 GA、粒子群优化 PSO 等对排间距进行精细化优化，将排间距优化问题构建成多目标优化问题。同时要设置约束条件。例如，最小排间距安全要求、安装和运维空间要求、设备物理尺寸限制以及特定区域间距范围等，优化算法在满足所有约束条件的前提之下，寻找一组或者多组在发电量、土地占用和成本上达到帕累托最优的排间距解，实施时，将阴影、动态调整及成本估算模型嵌入适应度评估函数，对每个候选方案进行评估，以便处理复杂关系和多维变量，获得最佳适合山地光伏电站排间距优化方案。

（四）注意要点

1. 分区与排列协同

固定-柔性支架分区与阵列空间整体排列设计紧密协同，彼此相互配合并且进行动态调整之后，才能够形成最优的整体布局方案。其中，分区结果为阵列排列提供框架与相应约束，从而指导不同区域采用合适的形态。例如，固定支架区大多呈现规整矩形阵列，柔性支架区可能沿着等高线等进行布置。阵列排列的初步方案以及优化需求会对分区结果进行验证和微调。例如在初步排列时，要是发现某固定支架区因为局部地形起伏，强行采用固定支架会导致土方开挖量较大，改为柔性支架区更为合适，此时就需要返回去调整分区并且重新进行排列设计。这种协同需要贯穿于整个设计流程。在 GIS 分区阶段，可初步考虑阵列走向和排布模式，通过叠置分析阵列与分区边界，以此保证分区合理。在三维建模阶段，应该严格按照分区来布置阵列，利用三维可视化检查分区边界衔接是否平顺，避免出现布局冲突或者浪费的情况。重点确保固定与柔性支架阵列过渡自然，柔性支架区需要依据其调节能力和地形特点，设计“之”字形、阶梯形等合理的排布形式，从而方便进行安装张拉。在排间距优化阶段，分区结果

决定着不同区域的优化目标与约束条件。例如农光互补区需要设置更大间距来满足作物生长等需求。分区与排列协同强调进行迭代优化，通过分区指导排列、排列反馈分区，最终实现区域划分合理、阵列布局高效。

2. 排列与间距协同

阵列空间的整体排列跟排间距的优化并非完全独立，而是处于紧密协同且相互反馈的状态。阵列的整体排列形态会对排间距的计算与优化造成影响。阵列是沿着等高线进行排布还是顺着坡向排布，会改变前后排之间的相对高差和阴影投射的路径，进而对最小排间距产生影响。在开展三维建模和 GIS 分析阶段，就应初步考虑到这些因素，从而为间距优化提供准确的输入内容。阵列排列的特定设计元素例如边界形状、内部通道位置和宽度以及不同阵列间距等，在进行排间距优化时都需要纳入考虑范围。预留出来的设备安装或者扩展空间，在计算土地占用的时候要将其扣除，不过在计算阴影时仍然要考虑其对光线传播所产生的影响。排间距优化算法要能够处理这些不规则的空间约束情况。排间距的优化结果尤其是多目标优化得出的不同方案，可以为阵列排列的进一步优化提供指导依据。如果优化结果要求某区域采用较小的排间距，而该区域地形又较为复杂，那么就可以对局部排布进行微调；如果需要扩大排间距，而初步排列又比较密集，那就需要调整排列方案。这种协同策略能够确保阵列布局和间距设计的一致性与最优性，避免出现效率低下以及资源浪费的问题。

四、结论

本研究聚焦山地光伏电站开发中的关键技术挑战，提出系统性的光伏阵列空间整体排列与排间距优化方法，该方法以具有高精度的地形数据为基础，通过系统梳理固定-柔性支架光伏阵列空间整体排列与排间距优化方法。期望能为山地光伏电站的设计、建设以及运营提供重要的技术支撑，进而促进能源转型和乡村振兴效能。

参考文献

- [1] 闫俊义, 刘毅, 刘立珍, 等. 有限元法作为滩涂光伏阵列桩基设计计算方法的适用性研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2024, 55(3): 1-10.
- [2] 张景凯. 内蒙古高速服务区光伏建设方案研究及经济性分析 [D]. 内蒙古农业大学, 2024.
- [3] 郭涛, 杨渊茗, 叶镇镇, 等. 脉动风空间相关性对柔性支撑光伏阵列的影响 [J]. 太阳能, 2025(4): 76-83.