

山地光伏阵列优化布置与发电量提升

丁敏强

大唐宝鸡第二发电有限责任公司 陕西 宝鸡 721000

摘要：山地光伏作为拓展光伏开发边界的重要方向，其发电量易受地形、阴影、温湿度及光照分布等复杂因素制约。本文围绕山地光伏阵列优化布置与发电量提升展开研究，先系统分析地形起伏、阴影遮挡、温度通风及光照资源分布特性四大核心影响因素；再明确减少阴影遮挡、最大化光照利用、兼顾通风散热、平衡经济性与可施工性的优化原则；进而提出基于地形建模、精准优化倾角方位角、调整间距组串排布及应用智能算法的优化方法；最后从模拟计算、实测数据、与平面项目对比三方面构建发电量提升效果评估体系。研究为山地光伏项目高效开发提供理论支撑与实践指导，助力提升山地光伏系统发电效率与经济效益。

关键词：山地光伏；阵列优化布置；发电量提升

引言：随着全球能源结构向清洁低碳转型，光伏产业迎来快速发展，但平原优质光伏资源日益稀缺，山地成为光伏开发的重要潜力区域。然而，山地地形复杂多变，与平面光伏相比，其阵列布置面临地形起伏导致的阴影遮挡不均、光照资源分布差异大、温度通风条件复杂等问题，严重影响发电量与项目收益，制约山地光伏规模化开发。因此，深入分析山地光伏阵列发电的关键影响因素，探索科学的阵列优化布置方法，建立有效的发电量提升评估机制，对突破山地光伏开发瓶颈、提高太阳能资源利用效率、推动光伏产业可持续发展具有重要现实意义，也成为当前光伏领域研究的重要课题。

1 山地光伏阵列发电的影响因素分析

1.1 地形因素

地形是山地光伏阵列布置的基础制约因素，其起伏形态、坡度与坡向直接影响光伏组件的安装条件与发电效率。山地常见的沟壑、山脊、陡坡等地形，会导致阵列布置难以保持统一高度与倾角，部分区域因坡度过大（如超过 25° ）可能增加支架安装难度与成本，甚至存在安全隐患。同时，坡向差异会改变组件接收太阳辐射的时长与强度，南向坡因光照条件最优通常为优先选择区域，而北向坡、背阴坡则需通过调整倾角弥补光照不足，地形起伏还可能引发局部区域排水不畅，雨天积水易腐蚀组件支架，进一步影响系统使用寿命与发电稳定性。

1.2 阴影遮挡因素

阴影遮挡是导致山地光伏发电量损失的核心因素，相较于平面光伏，山地地形的立体遮挡问题更为复杂。遮挡来源包括山地自身的地形遮挡（如相邻山坡、凸起地形对低洼区域的遮挡）、阵列内部组件间的相互遮挡，以及周边树木、建筑物等外部遮挡。地形遮挡具有

规律性，通常在日出日落时段或冬季太阳高度角较低时更为严重，可能导致部分组件长期处于阴影中，不仅降低自身发电量，还会引发组串内的“热斑效应”，损坏组件并影响整个组串的发电效率。此外，山地阵列间距设计若未充分考虑地形高差，易出现上坡组件遮挡下坡组件的情况，造成不可逆的发电量损失。

1.3 温度与通风因素

温度与通风条件直接影响光伏组件的光电转换效率，山地复杂的地形会导致区域内温度分布不均与通风效果差异。光伏组件的最佳工作温度通常在 25°C 左右，温度每升高 1°C ，效率约下降 $0.3\% \sim 0.5\%$ 。山地中低洼、密闭的山谷区域，空气流通性差，夏季易形成局部高温环境，导致组件长期处于高温工况，效率大幅降低；而山脊、高坡等开阔区域，通风条件良好，组件散热效率高，工作温度更接近最佳区间。同时，山地夜间温度较低，昼夜温差较大，可能加剧组件玻璃与背板的热胀冷缩，长期下来影响组件密封性，此外，潮湿的山谷环境若通风不足，还可能增加组件表面凝露与霉菌滋生风险，进一步降低发电性能。

1.4 光照资源分布特性

光照资源分布的不均一性是山地光伏与平面光伏的显著差异，山地地形通过改变太阳辐射的接收路径，形成区域内光照强度与时长的明显分化。受地形遮挡与坡向影响，同一山地不同区域的年总辐射量差异可达 $20\% \sim 30\%$ ，例如南向陡坡区域因太阳辐射入射角更优，年辐射量可能比北向缓坡高 15% 以上。此外，山地云层分布与移动规律也会影响光照稳定性，山谷区域易形成局地云雾，导致光照强度波动频繁，影响逆变器的最大功率点跟踪（MPPT）效果，降低系统整体发电效率^[1]。

2 山地光伏阵列布置的优化原则

2.1 减少阴影遮挡原则

在山地光伏阵列布置中，减少阴影遮挡是提升发电效率的关键。由于山地地形起伏，周边山体、树木等易对光伏组件形成遮挡，尤其在早晚或低太阳高度角时段。为遵循此原则，前期需进行精确的地形测绘与阴影模拟分析，明确不同时段、季节的阴影范围。布置时，依据分析结果合理调整组件间距与方位，使组件尽可能避开阴影区域。对于不可避免的遮挡，可通过优化组件倾角、采用可调节支架等方式，降低遮挡对发电的影响。同时，定期清理组件周边遮挡物，保证光照通道畅通，确保光伏阵列在全生命周期内减少阴影干扰，稳定高效发电。

2.2 光照利用最大化原则

实现光照利用最大化是山地光伏阵列布置的核心目标。山地光照资源分布不均，不同坡向、坡度的光照强度和时长差异明显。布置时应优先选择光照资源丰富的区域，如南坡等向阳坡面。根据当地太阳轨迹和光照特点，精准确定组件的最佳倾角和方位角，使组件表面与太阳光线尽可能垂直，提高光照接收效率。此外，采用分散式布置方式，依据地形灵活调整组件位置，避免因集中布置导致部分组件光照不足。还可结合智能跟踪系统，让组件随太阳位置移动而转动，进一步增加光照接收量，提升整体发电量。

2.3 通风散热兼顾原则

通风散热对山地光伏阵列的性能和寿命至关重要。光伏组件工作时会产生热量，若散热不畅，会导致组件温度升高，降低发电效率，甚至损坏组件。山地地形复杂，部分区域通风条件较差，因此布置时要兼顾通风散热。合理规划组件间距，保证空气能够在阵列间自由流通，形成良好的通风通道。避免组件紧密排列导致热量积聚。同时，选择通风良好的场地进行布置，如山顶、山坡开阔地带等。对于通风困难的区域，可考虑采用散热性能更好的组件材料或增加散热装置，如散热鳍片、风扇等，确保光伏阵列在适宜的温度环境下运行，提高发电稳定性和可靠性。

2.4 经济性与可施工性原则

山地光伏阵列布置需充分考虑经济性与可施工性。经济性方面，要在满足发电需求的前提下，合理控制项目成本。包括优化组件选型，选择性价比高的产品；合理规划阵列规模，避免过度投资；降低运维成本，提高项目整体经济效益。可施工性上，山地地形复杂，施工难度大，布置方案要便于施工操作。充分考虑场地平

整、道路运输、设备安装等因素，选择合适的施工工艺和设备。例如，采用模块化设计，便于组件的运输和安装；合理规划施工顺序，提高施工效率。确保项目在经济上可行，施工上顺利，实现山地光伏项目的可持续发展。

3 山地光伏阵列优化布置方法

3.1 基于地形建模的布局规划

基于地形建模的布局规划是山地光伏阵列优化的基础。首先，利用先进的测绘技术，如无人机倾斜摄影、三维激光扫描等，获取山地高精度的地形数据，构建详细的三维地形模型。通过该模型，能够直观呈现山地的坡度、坡向、高程等信息。接着，结合光照模拟软件，分析不同地形区域的光照资源分布情况，确定光照充足且稳定的区域作为光伏阵列的优先布置场地。对于地形复杂区域，如山谷、陡坡等，根据地形特点进行灵活调整，采用分散式或阶梯式布局，使组件尽可能贴合地形，减少土方工程量和生态破坏。同时，考虑地形对排水的影响，合理规划阵列的排水方向，避免积水对组件造成损害，确保光伏阵列在不同地形条件下都能实现高效布置。

3.2 倾角与方位角的精准优化

倾角与方位角的精准优化对山地光伏阵列的发电效率至关重要。倾角影响组件接收太阳辐射的量，不同地区、不同季节的最佳倾角有所差异。通过分析当地的历史气象数据和太阳轨迹，结合数学模型计算，确定全年综合发电量最大的最佳倾角。方位角决定了组件朝向，在北半球，一般正南方向能接收最多的太阳辐射，但在山地环境中，需根据地形和周边遮挡物进行调整。利用专业的光伏设计软件，模拟不同倾角和方位角组合下的发电情况，进行多方案对比分析，找出最适合该山地项目的倾角和方位角组合，使光伏组件在各种条件下都能最大程度地接收太阳光，提高发电量^[2]。

3.3 间距与组串排布优化

间距与组串排布优化是减少阴影遮挡、提高土地利用率的关键。间距过小会导致前排组件在特定时段遮挡后排组件，影响发电效率；间距过大则会浪费土地资源。根据当地的太阳高度角、方位角以及地形坡度，结合组件的尺寸和安装高度，精确计算组件之间的最小间距，确保在全年各个时段都不会产生阴影遮挡。在组串排布方面，考虑地形起伏和光照分布的不均匀性，采用不规则排布方式，使组串能够更好地适应地形，提高光照接收的均匀性。同时，合理规划组串的连接方式，减少线路损耗，提高电能传输效率，实现光伏阵列的整体优化布置。

3.4 借助智能算法的全局优化

借助智能算法进行全局优化能够综合考虑多种因素，实现山地光伏阵列的最优布置。常用的智能算法包括遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等。这些算法可以以发电量最大、成本最低或综合效益最高为目标函数，将地形、光照、阴影、温度等多种影响因素作为约束条件，对光伏阵列的布局、倾角、方位角、间距等参数进行全局搜索和优化。通过不断迭代计算，智能算法能够在复杂的山地环境中找到接近最优的布置方案。与传统的优化方法相比，智能算法具有更强的全局搜索能力和适应性，能够处理多变量、非线性的优化问题，为山地光伏阵列的优化布置提供更科学、更高效的解决方案。

4 发电量提升效果的评估方式

4.1 模拟计算评估

模拟计算评估是借助专业软件对山地光伏阵列发电量提升效果进行预先分析的重要手段。利用三维地形建模软件构建精确的山地地形模型，结合当地的气象数据，如太阳辐射强度、日照时长、温度、风速等，输入到光伏发电模拟软件中。这些软件能够综合考虑地形起伏、阴影遮挡、组件倾角与方位角、间距与组串排布等多种因素对发电量的影响。通过设置不同的优化布置方案参数，模拟计算出各方案下的理论发电量。对比优化前后的模拟发电量数据，能够直观地评估出优化布置方法对发电量提升的幅度。同时，模拟计算还可以分析不同季节、不同天气条件下的发电量变化情况，为项目的前期规划和决策提供全面、详细的数据支持。不过，模拟计算结果基于一定的假设和模型，与实际情况可能存在一定偏差，需要结合其他评估方式进行验证。

4.2 实测数据评估

实测数据评估是通过实际监测山地光伏阵列的运行数据来评估发电量提升效果，具有较高的准确性和可靠性。在光伏阵列中安装高精度的监测设备，实时采集组件的输出功率、电流、电压等参数，以及环境温度、太阳辐射强度等数据。持续监测一段时间后，对采集到的数据进行整理和分析，计算出实际发电量。将优化布置后的实际发电量与优化前的历史发电量数据进行对比，能够准确得出发电量提升的具体数值和比例。此外，通

过对不同时间段、不同天气条件下的实测数据进行分析，还可以深入了解优化布置方法在各种实际工况下的效果，发现可能存在的问题并及时进行调整和改进。实测数据评估虽然准确，但需要投入一定的监测设备和人力成本，且监测周期较长。

4.3 与平面光伏项目对比评估

与平面光伏项目对比评估是一种从相对角度评估山地光伏阵列发电量提升效果的方法。选取与山地光伏项目规模、组件类型、设备配置等相近的平面光伏项目作为参照对象。确保两个项目处于相似的气候区域，具有可比性的光照资源条件。分别收集山地光伏项目优化布置前后的发电量数据以及平面光伏项目的发电量数据。通过对比山地光伏项目优化前与平面光伏项目的发电量差异，了解山地地形对发电量的初始影响程度；再对比优化后山地光伏项目与平面光伏项目的发电量，评估优化布置方法在缩小与平面光伏项目发电量差距方面的效果。这种对比评估方式能够清晰地展示山地光伏阵列优化布置的成效，同时也为进一步改进山地光伏项目的设计和运行提供参考依据。但需要注意的是，完全相同的参照项目较难找到，对比结果可能存在一定的局限性^[3]。

结束语

山地光伏阵列的优化布置是实现发电量提升、推动山地光伏产业高质量发展的核心路径。通过基于地形建模的精准布局、倾角与方位角的精细调适、间距与组串排布的科学规划，以及智能算法的全局优化，可有效克服山地复杂地形带来的阴影遮挡、光照不均等难题，充分挖掘山地光伏的发电潜力。未来，随着技术的持续革新，如更高效的光伏材料、更智能的优化算法以及更先进的监测技术涌现，山地光伏阵列的优化布置将迈向新高度，发电量有望进一步提升，成本持续降低。

参考文献

- [1]张军,王俊杰.试析光伏阵列发电量损失评估测量方法[J].现代工业经济和信息化,2020,10(08):60-61.
- [2]孙松源,毛翌春,朱炬.光伏阵列发电量损失评估测量方法[J].工业仪表与自动化装置,2020,(02):109-111.
- [3]陈建国,刘畅,朱同鑫.并网光伏电站的生产运行数据分析[J].太阳能,2020(1):47-54.