

数字化设计技术在复杂地形光伏设计中的运用

熊梓农

中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司 福建福州 350003

摘要: 在世界范围内,随着科学技术的快速发展以及对可再生能源需求的不断增加,光伏发电这种清洁可再生的新能源形式已经被世界上许多国家所重视。但是,目前对光伏电站的规划建设,特别是在复杂地形条件下的光伏发电板布局设计,提出了更高的要求。从高山丘陵到广袤沙漠,各种地形条件都对光伏发电的设计与建设提出了严峻的挑战。在这种情况下,数字化设计方法的引入,给复杂地形下的光伏设计带来了革命性的变革。对此,本文对数字化设计技术在复杂地形光伏设计中的运用作出研究。

关键词: 数字化设计;复杂地形;光伏设计;应用措施

目前,以GIS、三维建模、无人机测绘、大数据分析 and 人工智能为代表的数字化设计方法,正在逐渐融入到光伏发电的设计过程中。这些方法既可实现对复杂地形的准确仿真,又可实现阵列布局设计的快速、高效、低成本,且可保证建筑的安全性与环保性。以某市郊山区光伏发电工程为例,由于该区域地势起伏不定、植被覆盖繁多,传统设计模式,需要通过实地勘察、多次修改规划,无法准确把握光照条件和光伏发电布置对周边环境的影响。而在此基础上,运用数字化设计方法,项目团队通过无人机进行高空测绘,获得精确的地形数据,并在地理信息系统中建立精细的3D模型。基于该模型,利用AI算法分析光照条件、阴影遮挡等因素,调整光伏板的角度和间距,实现最大程度接收阳光照射,提高发电效率。在此基础上,结合大数据分析,预测环境因素如风速、温度等对光伏发电系统的影响,进而对其进行设计优化,降低维护成本。

一、复杂地形光伏设计面临的挑战

(一) 地形多样性

以山地、丘陵和沙漠为例,各类型地貌具有各自的特征与局限性,需要在保证安全和可持续发展的前提下,采用有针对性的设计方法,进行最优布局。

山地地形坡度起伏大,日照时间快速变化,对光伏阵列的朝向、倾角和间隔等均有较高的要求。设计师需要针对山区特定的地形、坡向等因素,对阵列方位进行

灵活调节,以保证每一块光伏发电板均能得到充分的光照。同时,还要考虑雨水冲刷、积雪等天然因素对光伏发电组件性能的影响,制定相应的防雨、抗风加固方案,保证光伏发电组件的长期稳定性。在较陡的山地设置,更要注重安全性及环境防护,不能对山体造成损害。

丘陵地带的地形起伏相对平缓,但依旧存在变化,在进行设计时,要充分利用地形的天然差异,如不规则布置,以减小荫蔽,增加用地利用率。另外,丘陵地区由于四季变化不同,光照强度也会存在一定差别,因此,在进行设计时,也要根据不同季节进行合理调节,以满足不同的日照要求。另外,丘陵地区有一定的水土流失风险,因此,在进行设计时,必须采取相应的水土保持技术,以保障区域生态环境。

沙漠区域具有较好的日照条件,但应注意极端高温、干旱及沙尘暴等问题。光伏发电板需要具有优良的耐候性、抗灰尘等特性,并在保证其高效散热的前提下,防止由于温度过高而引起的器件性能退化。在沙漠地区,由于水源匮乏,常规的净化方法受到制约,所以需要使用节水型清洁技术,例如自动化的净化装置,或者是设计易于清理的布局结构。另外,为维护生态平衡,光伏项目还需与本地生态环境保持一致,例如修建绿化带,以减缓风力侵蚀等。

(二) 日照资源分析

在复杂地貌条件下,如何准确分析和充分利用太阳能,是当前研究热点和难点。这一过程需要从地理位置、气候条件、海拔高度、周围环境和季节等多个方面进行全面的分析。比如,靠近赤道的地区,光照充足,有利

基金项目: 光伏工程数字化生产线技术路径研究与开发 (编号: 35-KBYZ2-2024-036)

于光伏发电的布局。但在中国东北部等高纬区域，由于其冬天日照时长明显缩短，且相对于其他区域而言，其光照强度明显降低，因此需要在设计过程中引入追踪式或高效光电器件，使其能够充分发挥现有的光照资源^[1]。另外，在我国东南部沿海等季风性气候地区，多云多雨天气对日照的持续时间和强度产生重要的影响，因此，在优化设计光伏板结构的基础上，既要保证光伏板不被潮湿损害，又要加大清洁频率，保证面板洁净，提升发电效能。

（三）环境适应性

自然条件如风速、气温和积雪等，不但会对光伏发电系统的工作性能和使用年限产生重大的影响，而且还会对其安全造成一定的危害。比如，在高风区，若光伏发电板没有固定好或者没有进行有效的抗风处理，则会造成光伏发电板的变形和组件破坏，严重时会造成整个结构的坍塌。另外，在较高频率的风力作用下，光伏发电的光电转换性能也将受到极大的限制。而温度状况也是重要的影响因素。在高温条件下，光伏组件工作温度升高，会引起器件的光电转化效率下降和热斑效应，从而影响器件的使用寿命。然而，极端低温会让电池板内部的电解质冻结，从而影响到电池性能。为此，需要采用具有优异耐高温和低温性能的新型结构，并建立高效的冷却系统，使其能够在不同环境下持续可靠地工作。

此外，积雪对光伏发电的影响也是不可忽略的。在冰雪覆盖的区域，积雪不仅会阻挡日照，减少受光能力，还会影响太阳能的利用；而且由于积雪的重力，也会使托架受到很大的压力，从而使其变形。另外，积雪中的盐分等其它物质也会对光伏板造成腐蚀，从而缩短光伏板的寿命。为此，在设计中需要选择耐腐蚀材料，并且要对支撑结构进行适当设计，保证其在经受住积雪荷载的情况下不会受到破坏，还需要在地面上设置一些简易清扫设备或者是设置一些自动化除雪设备来降低对发电效率的影响。

（四）成本考量

首先是土地获取与准备成本显著增加。在地形起伏较大的山区，征地过程中需要进行大量的法律手续、环境评价和生态赔偿；同时，由于土质疏松、岩体分布不均等原因，征地难度加大，需要进行大量的爆破、开挖及回填工作，从而大大提高了项目的前期投资。其次，物料的运送和施工费用也不容忽视。在复杂的地形条件下，光伏板、支架和逆变器等大部件难以搬运，必须使用专用车辆或进行多次中转，从而增加了物流费用。由

于施工过程中，高处作业量的增加，对专业人员的素质要求也随之提高，因此需要采取更为严密的安全防护措施，这些都将导致劳动成本的提高^[2]。此外，由于地形环境的复杂性，光伏发电系统设计需要更加灵活和自适应。例如，在具有较大梯度的坡地上进行光伏发电板的布置，需要解决板与板之间的最优夹角问题，从而使其产生更高的发电效能，并在此基础上保证结构的安全性和稳定性，从而达到防止山体崩塌等灾害的目的。这种技术革新通常会带来较高的研究开发成本和咨询成本。

二、数字化设计技术在复杂地形光伏设计中的具体应用

（一）GIS与遥感技术分析地形地貌，辅助选址决策

地理信息系统（Geographic Information System GIS）将海拔模型、坡度、坡向等多种信息融合在一起，形成了一种立体的“数字地形”。在选址过程中，GIS可以快速地确定适合安装光伏板的位置，比如避免阴影遮挡、考虑最佳朝向来提高光照时长。此外，结合遥感技术，获得高分辨率遥感影像与无人机航拍资料，对地表植被（森林、草地、沙漠等）进行精细化的分析研究，并对其有无建筑物遮挡等问题进行确定。基于上述分析，采用GIS和遥感技术相结合的方法，可以生成多套选址方案，并对其发电效率、土地利用率和生态效益的评估^[3]。比如，模拟不同安装角度和间距对发电效益的影响，以此来实现阵列布局的最优化，降低遮挡或其他相互干扰因素。在此基础上，将生态保护红线和土地利用规划等政策导向相结合，保证项目选址在满足经济和法律规定的前提下进行。

（二）应用BIM技术构建三维光伏阵列模型，精确模拟安装效果

采用BIM软件（如Autodesk Revit, EnSight等）引入地形数据，包括无人机航拍、卫星影像、GIS等高精度地图。利用3D建模软件，将山峰、峡谷、坡度等地貌要素逐一还原出来，保证所建立的模型具有较高的真实性。然后，将光伏板参数（如面板尺寸、安装角度、间距等）进行迭代、设定。这样，不但可以让设计者更好地了解各个光伏板的安装效果，而且可以对光伏发电效率和潜在的阴影遮挡问题进行分析。此外，利用BIM建模方法，还可以对光伏阵列在不同时段内的光照情况进行仿真，其中包含夏、冬两个季节的日照轨迹，进而对其实际发电性能进行评估。同时，BIM可以模拟出不同气象因素，如风速、气温等对光伏系统的影响，从而

达到优化设计的目的。比如，将光伏发电板安装到陡坡上，利用该模型可以准确地确定各个光伏板的倾角，保证光伏发电板能够获得最大限度的日照，并且不会互相影响^[4]。

在建模时，可以将支架的材料、规格和重量等细节数据直接嵌入到建模中，为后续采购和安装提供精确的数据支持。BIM模型的精细化也表现在了施工说明上，它能产生包含各部分准确位置、安装顺序以及需要注意的细节的设计图以及安装指南，这极大地降低了工程中的误差与不确定性。同时，BIM也可以作为一种资源管理手段，用于记录光伏发电设备的故障报告和维修记录。利用BIM建模方法，对光伏发电设备运行状态进行实时采集，从而对潜在问题进行有效处理。比如，某个区域光伏发电板出现遮挡问题，那么可以利用该模型来调节光伏板的排列方式或者提高光伏板的清洁频率。

（三）3D建模下的组件排列优化，减少阴影遮挡

在3D建模过程中，光伏发电模块布局的优化是其中的核心问题。常规的2D设计方法很难准确地展示出复杂地表下的阴影遮挡状况，而3D建模可以直接显示各个构件的空间分布以及它们之间的联系。在系统设计中，需要使用算法对各个时段的太阳照射轨迹进行自动求解，并对各个部件的光照时长进行解析，避免相互之间的阴影遮挡。比如，在山区光伏项目中，可以根据山体的走向，采取倾斜式的排列方式，这样不仅能更好的满足当地的地形条件，而且还能减小由于地形对光照的影响。同时，与机器学习算法等人工智能方法相融合，通过学习历史数据，对未来若干年的光照条件进行预测，从而对组件布局进行优化。比如，通过对历史某一时段的气象观测数据进行建模，预测特定季节的云层遮挡情况，进而对各组件的朝向和海拔进行修正，以实现日照资源的最大化利用。在实践中，设计人员还要将光伏发电板的密集程度和间隔作为考量因素。密集布置在改善土地利用的同时，也会增大遮挡效果；但是，如果间隔太大，就会造成空间的浪费^[5]。借助3D建模，对各种密度、间隔等因素下的发电效能进行仿真，并寻求最优均衡方案。为了便于维护，需要在设计时预留出一定宽度的出入口，以保证操作人员能够安全便捷地到达各个部件进行维修。

（四）通过AI与大数据分析，实现运维管理预测

基于AI算法，系统能够学习并分析运维数据，通

通过对设备故障模式、环境因素（温度、湿度、光照等）的监测和分析，研究不同地域环境对光伏板寿命的影响。基于此，AI模型可以对设备的失效概率进行预估，并对潜在问题进行早期预警，以便维修人员对其进行有效介入，降低由于设备失效造成的停工，保证光伏发电系统的稳定、高效。同时，结合大数据分析技术，可以对存储单元充放电周期、逆变器运行状况等潜在维修要求进行辨识，为维修人员制定个性化的维修方案。比如，在探测到某个光伏发电板的性能降低时，该装置会根据实际情况，为光伏发电提供必要的清洗或检修服务，以防止由粉尘堆积引起的电能转化效率降低^[6]。这样的预防维修措施可以极大地提高机器的使用年限，减少维修费用。

结束语

综上所述，将数字化设计方法应用于复杂地形环境下的光伏设计中，是实现科技与绿色能源有机融合的关键途径。该技术不但可以克服以往光伏发电系统在结构设计上存在的许多问题，而且还将促进光伏发电产业向智能化和高效率方向发展。未来，结合物联网、云计算和边缘计算等前沿科技，将实现光伏发电的智能化和自动化，促进光伏发电的高效、绿色和经济发展。同时，将气候学、生态学、材料学等多学科知识和数字化设计方法有机地结合起来，有助于开发出能更好应对不同极端条件的光伏发电系统。

参考文献

- [1] 李正雄, 胡振华, 潘旭峰. 不同地形条件山地光伏用地适用性分析[J]. 云南水力发电, 2024, 40(10): 185-187.
- [2] 田成, 李伟, 林军才. 大坡度复杂地形柔性光伏支架施工方法研究[J]. 红水河, 2024, 43(04): 110-114.
- [3] 杨学明. 复杂地形条件下光伏柔性支架应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (03): 10-12.
- [4] 姚丹. 复杂地形区域内光伏阵列布置方案优化[J]. 电工技术, 2022, (04): 55-57.
- [5] 吴建鹏, 尹杰. 山地光伏电站大尺寸光伏组件应用难点及控制措施[J]. 新能源科技, 2022, (05): 21-23.
- [6] 周润. 柔性光伏支架结构设计探讨[J]. 能源与节能, 2023, (01): 22-24+170.