

光伏电站结构与优化研究

孙艳坤

中国华电科工集团有限公司 北京 100160

摘要：光伏电站结构类型多样，包括地面光伏电站、分布式光伏电站和特殊场景光伏电站，各有特点与适用场景。结构设计需综合考虑荷载分析、材料选择、连接方式等关键要素。设计方法涵盖结构选型与布置、力学性能分析和经济性分析，以确保结构安全、经济、合理。结构优化方法有参数化建模与优化算法、多目标优化策略和智能优化技术应用，可提高优化效率和精度，为光伏电站结构优化提供更科学、智能的技术支持。

关键词：光伏电站；结构设计；优化

1 光伏电站结构类型

光伏电站作为将太阳能转化为电能的重要设施，其结构类型多样，不同的结构类型适用于不同的应用场景和需求。

1.1 地面光伏电站

地面光伏电站通常建设在开阔的地面区域，如荒漠、戈壁、闲置土地等。这类电站规模一般较大，装机容量从几十兆瓦到数百兆瓦不等。其结构主要由光伏组件支架、基础、逆变器室、升压站等部分组成。光伏组件支架一般采用钢结构，通过合理的设计和布置，使光伏组件能够以最佳的角度接收太阳辐射。基础部分根据地质条件的不同，可选择桩基础、独立基础等形式，以确保支架的稳定性和安全性。地面光伏电站的优势在于土地资源丰富，便于大规模建设和集中管理，能够充分利用太阳能资源，实现较高的发电效率。然而，其建设也面临着一些挑战，如需要占用大量土地，可能对生态环境产生一定影响，同时前期投资较大，建设周期相对较长。

1.2 分布式光伏电站

分布式光伏电站主要安装在用户侧，如工业厂房、商业建筑、居民住宅等屋顶上。它的特点是规模相对较小，装机容量一般在几千瓦到几十兆瓦之间。分布式光伏电站的结构相对简单，主要包括光伏组件、逆变器、支架等。光伏组件直接安装在屋顶上，支架通常采用轻型材料，以减轻对屋顶的荷载^[1]。逆变器将直流电转换为交流电后，可直接供用户使用，多余的电量还可以并入电网。分布式光伏电站的优势在于能够就近发电、就近使用，减少了输电损耗，提高了能源利用效率。同时，它还可以为用户带来一定的经济效益，降低用电成本。分布式光伏电站的建设周期短，对环境影响小，是一种绿色、可持续的能源利用方式。

1.3 特殊场景光伏电站

特殊场景光伏电站是指针对一些特殊环境或特殊需求而建设的光伏电站，如水上光伏电站、农光互补光伏电站、光伏扶贫电站等。水上光伏电站建设在水面上，如湖泊、水库、鱼塘等，其结构需要考虑防水、防潮、抗风浪等因素。光伏组件支架一般采用浮体式结构，通过锚固系统固定在水面上。农光互补光伏电站是将光伏发电与农业生产相结合，在光伏组件下方进行农业种植或养殖。这种电站的结构设计需要兼顾光伏发电和农业生产的需要，确保光伏组件不会对农作物生长或养殖活动造成影响。光伏扶贫电站则是为了帮助贫困地区脱贫致富而建设的，通常建设在贫困地区的屋顶或闲置土地上。其结构设计要注重经济性和实用性，确保电站能够稳定运行，为贫困地区带来长期的经济效益。

2 结构设计关键要素

光伏电站的结构设计需要综合考虑多个关键要素，以确保电站的安全、稳定和高效运行。

2.1 荷载分析

荷载分析是光伏电站结构设计的基础。光伏电站所承受的荷载主要包括永久荷载、可变荷载和偶然荷载。永久荷载是指长期作用在结构上的荷载，如光伏组件、支架、基础等的自重。可变荷载是指随时间变化的荷载，如风荷载、雪荷载、温度荷载等。风荷载是光伏电站结构设计中最主要的可变荷载之一，其大小和方向会随着地理位置、地形地貌、风速等因素的变化而变化^[2]。雪荷载在寒冷地区也需要重点考虑，过大的雪荷载可能会导致光伏组件和支架的损坏。温度荷载是由于温度变化引起的结构变形和内力，在设计时需要合理考虑结构的热胀冷缩，避免因温度变化导致结构破坏。偶然荷载是指偶然发生的荷载，如地震荷载、爆炸荷载等。虽然偶然荷载发生的概率较小，但一旦发生，可能会对

电站造成严重的破坏,因此在设计时也需要进行适当的考虑。

2.2 材料选择

材料选择直接影响光伏电站结构的质量和性能。光伏组件支架一般采用钢材或铝合金材料。钢材具有强度高、承载能力大等优点,但容易生锈,需要进行防腐处理。铝合金材料具有重量轻、耐腐蚀性好等优点,但价格相对较高。在选择钢材时,需要根据结构的设计要求和当地的腐蚀环境,选择合适的钢材牌号和防腐措施。基础材料一般采用混凝土或钢筋混凝土,其强度和耐久性需要满足结构的使用要求。光伏组件的边框材料、连接件材料等也需要根据实际情况进行选择,确保其具有良好的机械性能和耐久性。

2.3 连接方式

连接方式是光伏电站结构中各部件之间传递荷载和保证结构整体性的关键。光伏组件与支架之间的连接一般采用螺栓连接或夹具连接。螺栓连接具有连接可靠、拆卸方便等优点,但需要注意螺栓的预紧力和防松措施。夹具连接则适用于一些特殊形状的光伏组件,能够快速、方便地实现组件与支架的连接。支架与基础之间的连接一般采用预埋件连接或化学锚栓连接。预埋件连接需要在基础施工时预先埋设,连接牢固,但施工精度要求较高。化学锚栓连接则具有施工方便、适用范围广等优点,但需要注意化学锚栓的质量和安装工艺。结构中的其他连接部位,如横梁与立柱的连接、节点连接等,也需要根据结构的受力特点和设计要求,选择合适的连接方式。

3 光伏电站结构设计方法

为了设计出安全、经济、合理的光伏电站结构,需要采用科学的设计方法。

3.1 结构选型与布置原则

结构选型与布置作为光伏电站结构设计的首要环节,对整个电站的性能与成本有着深远影响。在进行结构选型时,必须全面且细致地考量光伏电站的类型、规模、地理位置以及地质条件等多方面因素,并综合权衡结构的安全性、经济性和适用性。以地面光伏电站为例,常见的支架类型有固定倾角支架和跟踪支架。固定倾角支架结构较为简单,安装工艺成熟,成本相对较低,不过由于光伏组件角度固定,无法实时追踪太阳位置,发电效率相对有限。而跟踪支架能够依据太阳的实时位置自动调整光伏组件的角度,最大程度地接收太阳辐射,从而提高发电效率,但它的成本较高,不仅设备采购费用增加,而且后续的维护难度也较大,对维护人

员的专业水平要求较高。在结构布置方面,要精准合理地确定光伏组件的间距和排列方式,避免组件之间相互遮挡,影响发电效率。同时,还需充分考虑施工安装的便捷性以及后期维护的可达性。另外,要依据当地的地形地貌和地质条件,科学地选择基础的类型和布置方式,保证基础具备足够的稳定性和安全性,为光伏电站的长期稳定运行奠定坚实基础。

3.2 力学性能分析

力学性能分析是光伏电站结构设计的核心内容。通过力学性能分析,可以确定结构在各种荷载作用下的内力和变形,评估结构的安全性和可靠性。常用的力学性能分析方法包括有限元分析法、结构力学分析法等^[3]。有限元分析法是一种数值分析方法,通过将结构离散化为有限个单元,建立单元的力学模型,然后通过求解单元的力学方程,得到整个结构的内力和变形。结构力学分析法则基于结构力学的基本原理,通过建立结构的力学模型,采用手算或软件计算的方法,求解结构的内力和变形。在进行力学性能分析时,需要考虑各种荷载的组合情况,如基本组合、标准组合、频遇组合等,以确保结构在最不利荷载作用下仍能满足安全要求。

3.3 经济性分析

经济性分析是光伏电站结构设计的重要环节。在进行经济性分析时,需要综合考虑结构的初始投资成本、运行维护成本和发电收益等因素。初始投资成本包括结构材料成本、施工安装成本、设备采购成本等。运行维护成本包括结构定期检查、维修、更换部件等费用。发电收益则与光伏电站的装机容量、发电效率、电价等因素有关。通过经济性分析,可以选择出既满足安全要求又具有良好经济效益的结构设计方案。例如,在满足结构安全性的前提下,可以通过优化结构选型、材料选择和连接方式等,降低结构的初始投资成本;通过合理设计结构的维护方案,降低运行维护成本,提高光伏电站的经济效益。

4 光伏电站结构优化方法

4.1 参数化建模与优化算法

参数化建模在光伏电站结构优化中扮演着至关重要的角色。它通过将光伏电站结构的几何形状、材料属性以及荷载条件等关键要素进行参数化处理,构建出一个高度灵活且可调整的参数化模型。在几何形状方面,像光伏组件的倾斜角度、支架的间距与高度等都可以设定为参数;材料属性涵盖钢材的强度、铝合金的耐腐蚀性等;荷载条件则包括风荷载、雪荷载、温度荷载等。一旦建立了参数化模型,设计人员就能够方便快捷地对结

构进行修改和优化。而优化算法则是为了从众多可能的参数组合中找出最优的结构参数。遗传算法模拟了生物进化过程中的自然选择、交叉和变异机制。它首先生成一组初始参数组合作为“种群”，然后根据结构性能评估每个“个体”的适应度，通过选择操作保留适应度高的个体，交叉操作产生新的个体，变异操作引入随机变化，不断迭代优化，逐步逼近最优解。粒子群算法借鉴了鸟群觅食时的信息共享和协作行为。每个“粒子”代表一组参数组合，它们在解空间中飞行，根据自身历史最优位置和群体最优位置调整飞行方向和速度，从而寻找最优结构参数。模拟退火算法基于物理退火过程，在搜索过程中允许接受一定概率的劣解，以避免陷入局部最优解，最终找到全局最优解。将参数化建模与优化算法相结合，可实现光伏电站结构的自动化优化，大大提高优化效率和精度。

4.2 多目标优化策略

在光伏电站结构优化过程中，往往需要同时考虑多个目标，这使得优化问题变得复杂多样。常见的优化目标包括结构的安全性、经济性和美观性等。结构的安全性要求结构在各种荷载作用下具有足够的强度和稳定性，能够抵御自然灾害和意外情况；经济性则关注初始投资成本、运行维护成本以及发电收益等，力求在满足安全要求的前提下降低成本、提高效益；美观性虽然相对主观，但在一些对景观有要求的场合也十分重要。为了处理这些多目标优化问题，多目标优化策略应运而生。加权法是一种简单直观的方法，它将多个优化目标赋予不同的权重，然后将多个目标函数加权求和，转化为一个单目标函数进行优化。这种方法的关键在于合理确定各个目标的权重，这通常需要根据实际需求和决策者的偏好来确定。约束法是将部分优化目标作为约束条件，将问题转化为单目标优化问题。例如，将结构的安全性要求作为约束条件，在满足安全性的前提下，对经济性目标进行优化。Pareto最优解法则是寻找一组满足所有优化目标的非劣解，即Pareto最优解集。这些解在各个目标之间达到了一种平衡，没有哪个解在所有目标上都优于其他解。通过多目标优化策略，设计人员可以在多个优化目标之间找到一个平衡点，得到满足实际需求的优化方案，为光伏电站结构优化提供了更全面、更科学的决策依据。

4.3 智能优化技术应用

随着人工智能技术的迅猛发展，智能优化技术在光

伏电站结构优化领域的应用日益广泛且深入。智能优化技术涵盖了机器学习、深度学习和强化学习等多个前沿领域，为光伏电站结构优化带来了全新的思路和方法^[4]。机器学习通过对大量结构数据进行学习和分析，能够挖掘出结构性能与结构参数之间的潜在映射关系。它可以利用历史数据建立预测模型，根据给定的结构参数预测结构的性能指标，如应力、变形等，从而实现了对结构性能的预测和优化。深度学习作为机器学习的一个重要分支，通过构建深度神经网络模型，能够处理更为复杂的结构数据和优化问题。深度神经网络具有强大的特征提取和学习能力，可以从海量的数据中自动学习到深层次的特征表示，为结构优化提供更准确的决策支持。强化学习是一种基于智能体与环境交互的优化方法。在光伏电站结构优化中，可以将结构优化问题看作是一个强化学习问题。智能体不断尝试不同的结构参数组合，通过与“环境”（即结构性能评估系统）进行交互，根据结构的性能反馈调整优化策略。例如，如果某个参数组合使得结构性能得到改善，智能体就会增加选择该组合的概率；反之，则会减少选择概率。通过不断地试错和学习，智能体最终能够找到最优的结构设计方案。智能优化技术的应用显著提高了光伏电站结构优化的智能化水平和效率，为光伏电站的优化设计提供了更强大、更灵活的技术支持。

结束语

光伏电站结构设计与优化是一个复杂且关键的领域，涉及多种结构类型、关键要素、设计方法和优化手段。通过合理选择结构类型、精准进行荷载分析、科学选材、优化连接方式，并运用先进的设计与优化方法，能够设计出安全、经济、高效的光伏电站结构。未来，随着技术的不断进步，光伏电站结构设计与优化将朝着更智能化、高效化的方向发展，为太阳能的大规模应用和可持续发展提供有力保障。

参考文献

- [1]李灵强.复合材料光伏支架梁结构优化分析[J].光源与照明,2021(8):100-102.
- [2]曾智钦,张元海,杨铭俊,等.固定式光伏支架选型经济性对比分析[J].太阳能,2023(11):18-24.
- [3]陆广萍.光伏电站设计建设的关键技术研究[J].中国科技纵横,2023(1):125-127.
- [4]侯亚新.探究光伏电站工程建设项目的管理策略[J].砖瓦世界,2023(22):112-114.