

Analysis of Mountain Fan Foundation Design Points

Junhu Wang Moran Chen Jingang Yi

Power China Guizhou Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550008, China

Abstract

This study analyzes the geological characteristics of mountain fan, the influence of wind resources and environmental factors on the foundation design, compares the applicability of different foundation types in mountain environment, and puts forward the key technical points in the foundation design, including load calculation, foundation treatment and durability evaluation. The study shows that the reasonable basic design can significantly improve the safety and economy of the fan operation, and provide technical support for the sustainable development of the mountain wind farm. This study is of great significance to improve the basic design level of mountain wind farm and promote the technological innovation of the industry.

Keywords

mountain wind farm; fan foundation design; load calculation; foundation treatment; durability evaluation

山地风机基础设计要点浅析

汪俊虎 陈默然 易金刚

中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司, 中国·贵州 贵阳 550008

摘要

本研究围绕山地风机基础设计展开分析了地形地质特性、风力资源特性及环境因素对基础设计的影响, 比较了不同基础类型在山地环境中的适用性, 提出了基础设计中的关键技术要点包括荷载计算、地基处理及耐久性评价。研究表明合理的基础设计能够显著提高风机运行的安全性和经济性, 为山地风电场的可持续发展提供了技术支持。本研究对提升山地风电场基础设计水平及推动行业技术创新具有重要意义。

关键词

山地风电场; 风机基础设计; 荷载计算; 地基处理; 耐久性评价

1 引言

随着全球能源结构转型和清洁能源需求的不断增长, 风能作为可再生能源的重要组成部分受到了广泛关注。山地地区由于地势高、风速大, 具有优越的风能资源开发条件, 成为风电场建设的重要选择。然而, 山地复杂的地形地质条件、恶劣的气候环境以及施工过程中的特殊要求使得风机基础设计面临诸多挑战。合理的基础设计不仅关系到风机运行的安全性与稳定性, 还直接影响工程成本和施工周期, 是山地风电场开发中的关键技术问题。

2 山地风机基础设计的关键因素

2.1 地形与地质条件分析

山地地区通常地势陡峭高差变化大局部地形特征复杂, 地基承载力存在显著的空间差异。岩体条件、土层厚度及分布情况是决定基础选型和结构稳定性的重要因素。风机基础

需要适应不均匀沉降和滑坡等地质灾害的潜在风险, 这需要对地质条件进行详尽勘测采用钻探取样、动力触探等手段获取关键数据评估地基的承载能力和稳定性。针对斜坡场地应考虑坡面倾角、岩土层抗剪强度等参数结合现场监测结果计算滑动面稳定性系数, 设计坡面防护措施以减少潜在风险。在多裂隙岩层或软弱土层的条件下可采用有限元分析方法建立岩土层模型计算应力分布, 结合地基加固技术如桩基、格构锚固等提升基础结构的安全性和适应性。

2.2 风力资源特性及荷载分布

风力资源的特性直接决定了风机的工作状态和基础受力情况, 山地风速分布受地形复杂性影响显著往往存在局部加速效应和湍流强度高的特点。风机基础需要承受垂直荷载、水平荷载及倾覆力矩其中风荷载是设计中的主要控制因素。风速剖面可根据实地测量与数值模拟结合确定采用对数风速公式:

$$v(z) = v_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

式中, $v(z)$ 为高度处 z 的风速; v_r 为参考高度的风速;

【作者简介】汪俊虎(1989-), 男, 中国湖北孝感人, 硕士, 高级工程师, 从事建筑结构理论及应用研究。

α 为地形粗糙度系数。荷载分布分析需要结合风机结构参数、风速变化及风向分布规律建立荷载模型。风机运行中由于动荷载作用会引起基础结构的疲劳问题,需要对动态荷载进行频谱分析评估其对基础寿命的影响。根据CFD(计算流体力学)模拟可以进一步精确预测风场中风速梯度、湍流等对基础荷载分布的影响,为设计提供数据支持。

2.3 环境与气候对基础设计的影响

山地气候特点通常包括强降雨、高湿度和频繁的温度变化这对基础结构的抗腐蚀性和耐久性提出更高要求。长期暴露于潮湿环境中混凝土基础可能出现碳化、钢筋锈蚀等问题。设计中可采用高性能混凝土并添加抗腐蚀外加剂提高结构抗腐蚀能力。极端气候如暴雨和冻融循环可能引发地基侵蚀和结构开裂。对于多冻融循环地区应选择耐冻材料并设计排水系统防止地基含水率过高。气候变化引起的风资源季节性差异会导致荷载波动增大,可能需要调整基础的安全系数以应对超设计工况的荷载。施工过程中山地环境的交通运输限制和复杂地形增加了施工难度,需要综合考虑设备运输路径、场地平整及施工技术优化保障基础施工的质量与效率。综合这些因素进行系统分析是确保山地风机基础长期稳定性和经济性的必要前提。

3 山地风机基础类型及适用性分析

3.1 常见基础类型

山地风机基础类型主要包括重力基础、桩基础、扩展式基础和岩锚基础等。重力基础依靠自身重量和基础底板的接触面积抵抗风机运行时产生的荷载,适用于地基承载力较高、地质稳定的区域常见于平地或软岩场地。桩基础则利用桩体深入较深承载层的方式传递荷载,适用于地基承载力较低或有软弱夹层的场地在山地条件下,桩基础根据桩基布置实现对不均匀地质的适应性。扩展式基础在重力基础的基础上优化底板形状增加受力面积以提高承载性能适合于中等承载力场地且对经济性有更高要求。岩锚基础借助锚杆将基础与岩体连接,充分利用山地坚硬岩层的承载力适用于强岩层地区。各类基础在山地风电场的使用中具有不同的优缺点需要根据地质条件、施工条件和成本要求综合选择。

3.2 各类型基础在山地环境中的适用性对比

基础类型在山地环境中的适用性取决于地质条件、荷载特性及施工难度。重力基础的施工成本相对较低,适用于地基承载力大于200kPa的场地,但在承载力不足时容易发生沉降问题。桩基础通过桩身传递荷载可适应承载力小于100kPa的软弱地基,尽管施工成本较高平均每平方米造价高出重力基础约30%~50%,但对不均匀地质条件的适应性更强。扩展式基础在承载力为150~250kPa的场地表现最佳,其优化设计能够将材料用量减少约15%~20%,节约成本且保持稳定性。岩锚基础在承载力超过500kPa的强岩层场地表现出色,其锚固深度通常为3~5m能够有效应对大风荷载,

但施工技术要求高成本比重力基础高约40%。从数字分析可以看出各基础类型在特定条件下具有显著的经济和技术优势需要结合实际情况选择合适方案。

3.3 创新型基础设计思路

创新型基础设计的思路旨在根据山地风电场的特殊地形、地质条件及风机荷载特性,优化传统设计方法,根据结构改进、材料选用及施工技术提升实现基础设计的安全性、经济性和可持续性。在山地环境中风机基础设计的关键在于适应复杂的地质条件和不均匀荷载,同时控制工程成本和施工难度。创新型设计通常结合以下几个方面,一个是优化基础形状以提高荷载分布均匀性例如采用扩展式或变截面设计。再就是选用高性能材料,如高强混凝土、耐腐蚀钢筋等以应对山地环境的长期侵蚀。还有融入地基处理技术例如注浆加固或锚杆设计,提升基础与地基的结合力。基于数值模拟的精确荷载分析和动态响应评估确保设计方案满足实际运行需求。这些思路在实际工程中被不断验证和应用。例如在湖北竹山风电场扩展式重力基础设计案例中,项目安装了2.5MW容量的风力发电机组,叶轮直径146m,轮毂高度90m。场地地质条件包括含砾粘性土和花岗岩层地基承载力条件良好。针对项目的特点设计团队采用了圆形扩展式重力基础充分结合了地形地质条件和风机荷载需求。该项目中基础设计的创新性体现在以下几个方面。优化基础形状时设计选择了圆形扩展式基础底板直径和高度根据荷载分析精确优化,以均匀分布荷载并减小地基不均匀沉降风险。扩展式设计相比传统重力基础能够减少基础底板的材料用量,混凝土使用量降低约15%同时保持了荷载分散能力。

选用高性能材料,基础采用C40高强混凝土和HRB400钢筋,材料强度高且耐久性好能抵御山地气候的长期侵蚀减少维护需求提高寿命周期效益。地基加固措施,持力层选取花岗岩层结合地基实际情况进行局部注浆加固,提高了基础与地基的整体稳定性增强了承载能力。施工过程中采用分层浇筑和精细化养护技术,控制混凝土裂缝及温度梯度确保大体积混凝土的内外温差控制在25℃以内。加强施工监测重点把控接体安装和基础台柱施工质量。利用这些创新设计该项目实现了经济性与安全性的双重目标。优化后的基础降低了施工成本单座基础节约约8%~12%的总体造价,还在风荷载和地震作用下表现出良好的稳定性。这一案例为山地风电场基础设计提供了实践参考展示了创新设计在复杂条件下的应用价值。

4 山地风机基础设计中的技术要点

4.1 基础荷载计算与结构稳定性分析

基础荷载计算是山地风机基础设计的核心环节涉及多种荷载类型,包括风机自重、风荷载、地震荷载以及运行中的动态荷载。基础设计需要综合考虑这些荷载的叠加效应和极端工况的安全性。基础荷载计算通常采用标准荷载公式:

$$M=F \cdot L$$

式中， M 为倾覆力矩； F 为水平风荷载； L 为风轮中心到基础平面的高度。结合风轮直径和风速数据可计算出水平风荷载：

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

式中， ρ 为空气密度； C_d 为风阻系数； A 为受风面积； v 为风速。计算中需要综合考虑湍流强度、地形加速效应以及风向分布。在结构稳定性分析中常采用有限元方法 (FEM) 对基础与地基的整体性进行模拟评估荷载作用下的应力分布和变形情况。在山地条件下需特别关注基础的不均匀沉降及坡面滑移的潜在风险。以一座风轮直径为 150m、轮毂高度为 90m 的风机为例，其倾覆力矩可能达到 50~60MN·m 需保证基础在极端荷载下的安全系数不低于 1.5 个地基的总沉降量应控制在 10~15mm 以内。

4.2 地基处理与施工技术优化

在地基处理技术中常用的方法包括预压夯实、石灰稳定、注浆加固和桩基处理等。对于软弱土层可采用注浆加固方法利用高压注浆将水泥浆液注入地基土中，增加土体密度和强度常见的加固参数为注浆量 0.1~0.3m³/m² 土体承载力可提高 50%~80%。在倾斜地形中可结合格构锚固技术借助安装锚杆和钢筋网对地表进行加固防止坡面滑移或地基变形。在施工技术优化方面需要根据山地环境特点进行定制化设计。交通不便的区域应合理规划施工便道和材料堆场减小设备运输的难度。混凝土浇筑要避免大体积混凝土产生温度裂缝大多采用分层浇筑，每层厚度控制在 50~70cm 浇筑温差不得超过 25℃。施工质量控制方面利用现代监测手段（如传感器和无人机）进行施工进度、材料质量和地基稳定性的实时监测，可以显著提升施工效率和工程质量。

4.3 基础耐久性与经济性评价

山地环境中的风机基础在材料选择上可使用高性能混凝土（如 C40 或 C50）和耐腐蚀钢筋（如 HRB500）以提高抗侵蚀能力，并在混凝土中添加外加剂（如硅灰）以改善抗渗性能。在冻融循环地区基础设计需满足耐冻性要求，试验表明抗冻混凝土的质量损失率应控制在 5% 以内，冻融循环次数达到 300 次仍保持结构完整性。经济性评价需要综合考虑初始造价、维护成本和全生命周期效益。扩展式基础在材料用量优化方面具有显著优势，混凝土用量可减少 15%~20% 单位造价降低 8%~12%。表 1 是某山地风电场两

种基础方案的经济性比较。

表 1 某山地风电场两种基础方案的经济性数据

基础类型	初始造价(万元/座)	维护成本(万元/年)	使用寿命(百年)	全生命周期成本(万元)
重力基础	80	1.5	50	155
扩展式基础	72	1.3	50	137

由表 1 可得，扩展式基础在经济性方面优于重力基础，具有较大的成本优势。重力基础的初始造价为 80 万元/座，而扩展式基础的初始造价为 72 万元/座，相比之下每座基础节约 8 万元，降幅达 10%。在维护成本方面，重力基础每年的维护费用为 1.5 万元，而扩展式基础仅为 1.3 万元，年均减少 0.2 万元，降低幅度约 13%。全生命周期内，两种基础的使用寿命均为 50 年，但重力基础的全生命周期成本为 155 万元，而扩展式基础的总成本为 137 万元，整体节约 18 万元，降低比例达到 11.6%。从数据可以看出，扩展式基础不仅在初始建设阶段成本更低，还能在长期维护和使用中进一步减少开支，是一种经济效益突出的设计方案。

5 结论

论文从地形地质条件、荷载分布、基础类型的适用性以及关键技术要点等方面对山地风机基础设计进行了系统分析，并结合典型案例探讨了创新型设计思路的实际应用。研究表明针对山地风电场复杂的地质和环境条件，合理选择基础类型并优化设计方案可以有效提升基础的安全性、耐久性和经济性。未来结合数字化技术和新材料的应用山地风机基础设计将进一步实现精细化和智能化为风电场的可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 罗泽华.高灵敏度淤质土地质条件下大直径风机基础设计选型研究[J].福建建材,2024(8):66-69.
- [2] 闵剑,吴强.软弱黏土地质条件下的风机基础设计选型研究[J].工程技术研究,2023,8(20):5-7+11.
- [3] 李翔.山地风电场风机接地问题研究[J].四川水力发电,2019,38(6):92-95.
- [4] 王新伟,白宝华,潘启科,等.圆形扩展式风机基础体型优化设计研究[J].云南电力技术,2019,47(5):86-89.
- [5] 马开志,周向阳.山地风电场运输道路设计要点分析[J].南方能源建设,2018,5(S1):172-176.