

复杂地形下风电建设工程的微观选址与风机布局优化研究

杨帆

中船浩鸿风电工程技术(宁波)有限公司天津分公司 天津 滨海新区 300452

摘要: 随着全球能源结构向清洁化、低碳化转型,风能作为可再生能源的重要组成部分,其开发规模持续扩大。然而,在我国中西部及山地丘陵地区,风电场多建于复杂地形条件下,地形起伏剧烈、风资源分布不均、湍流强度高,给风电工程的微观选址与风机布局带来巨大挑战。本文系统分析了复杂地形对风资源特性的影响机制,综述了当前主流的微观选址方法与风机布局优化模型,并结合数值模拟(CFD)与智能优化算法,提出一种融合多目标优化与不确定性分析的综合布局策略。研究成果可为复杂地形风电场的科学规划与高效开发提供理论支撑与实践指导。

关键词: 复杂地形; 风电工程; 微观选址; 风机布局; 计算流体力学; 多目标优化; 尾流效应

引言

在全球应对气候变化和实现“双碳”目标的背景下,风能作为技术成熟、环境友好的可再生能源,已成为各国能源战略的核心组成部分。然而,随着平原及近海优质风资源区域开发趋于饱和,风电开发逐步向内陆山地、高原、丘陵等复杂地形区域延伸。复杂地形通常指高程变化剧烈、坡度大、地表粗糙度差异显著的区域,如山脊、峡谷、陡坡等地貌。此类区域虽可能蕴藏较高风速资源,但其风场特性受地形扰动强烈,表现为风向多变、湍流强度高、垂直风切变显著等特点。若沿用平原地区风电场的设计经验,极易导致风机选型不当、尾流干扰加剧、设备疲劳损伤增加,进而影响风电场全生命周期的发电效率与经济收益。因此,如何在复杂地形条件下科学开展微观选址并优化风机布局,成为提升风电项目开发质量的关键技术瓶颈。微观选址不仅涉及风资源评估的精度,还需综合考虑地形限制、尾流效应、电网接入、生态约束等多重因素。而风机布局优化则需在有限可用地块内,通过合理排布风机位置,最大化能量捕获、最小化相互干扰,并兼顾投资成本与运维便利性。

1 复杂地形对风资源特性的影响机制

1.1 地形对风速与风向的扰动

在复杂地形环境中,大气边界层气流受到地形几何形态的强烈调制作用,导致局地风速与风向发生显著偏离自由大气状态的现象。当气流遇到山体时,迎风坡面会迫使气流抬升,从而在山脊顶部形成加速区,这种现象常被称为“地形加速效应”或“狭管效应”,可使局部风速较背景风速提升20%以上。相反,在背风坡区域,由于气流分离和再附着过程,往往形成低速回流区甚至静风带,严重削弱该区域的风能可利用性。此外,山谷或峡谷地形具有天然的导流作用,能够引导气流沿特定方

向集中流动,从而在通道内部形成稳定的高风能密度走廊。这种由地形主导的风场重构,使得传统基于平坦地形假设的风资源评估方法难以准确反映真实风况,必须借助高分辨率数值模拟手段加以刻画。

1.2 湍流强度与风切变特征

复杂地形对大气湍流结构的扰动尤为显著。由于地表起伏引发的机械湍流与热力湍流叠加,山地风电场的湍流强度普遍高于国际电工委员会(IEC)标准中定义的A类(16%)甚至B类(14%)等级。高湍流不仅降低了风机的能量转换效率,更关键的是会显著加剧叶片、主轴、齿轮箱及塔筒等关键部件的交变载荷,加速材料疲劳损伤,缩短设备服役寿命,增加运维成本与安全风险^[1]。与此同时,复杂地形下的垂直风切变呈现出高度非线性的空间分布特征。在某些陡坡或断崖区域,风速随高度的变化可能呈现跳跃式增长或局部衰减,传统的幂律风切变模型因假设风速随高度呈单调幂函数关系,难以准确拟合此类复杂剖面。因此,在微观选址阶段,需采用对数律模型或直接从CFD模拟结果中提取风切变参数,以提升风机轮毂高度设计的科学性。

1.3 尾流效应的复杂性

尾流效应是影响风电场整体发电效率的核心因素之一。在平坦地形中,风机尾流主要沿主导风向呈锥形扩散,其衰减规律相对明确,可采用Jensen等经典模型进行有效估算。然而,在复杂地形条件下,尾流传播路径受到地形曲率、坡度及局部障碍物的强烈干扰,可能出现偏转、汇聚、分裂甚至逆向回流等复杂行为。例如,当上游风机位于山脊,而下游风机处于谷底时,尾流可能被地形引导绕行或滞留于低洼区域,导致下游风机长期处于高湍流、低风速的不利工况。更严重的是,在多风机密集布置的场景下,多个尾流在复杂流场中相互叠加,

可能形成区域性“尾流池”，造成局部发电量损失高达20%以上。这种非线性、非定常的尾流干扰机制，使得传统基于均匀来流假设的尾流模型在复杂地形中适用性大幅下降，亟需发展耦合地形信息的高保真尾流预测方法。

2 微观选址关键技术体系

2.1 高精度风资源评估

在复杂地形风电开发中，风资源评估的精度直接决定了项目的技术可行性与经济合理性。传统的单点测风塔数据由于空间代表性有限，难以全面反映全场域内风况的空间异质性。为此，现代微观选址普遍采用“现场实测与数值模拟融合”的技术路线。首先，在场区内布设多座测风塔，并辅以声雷达（SODAR）或激光雷达（LIDAR）设备，获取不同海拔、坡向及地貌单元的风速、风向、湍流强度等关键参数，形成基础观测网络。其次，利用中尺度气象模型（如WRF）模拟区域背景风场，提供大尺度气象驱动条件。在此基础上，采用微尺度计算流体力学（CFD）模型，如OpenFOAM、WindSim或MetodynWT，结合高分辨率数字高程模型（DEM）与精细化地表粗糙度数据，对全场三维风场进行精细化模拟^[2]。CFD模型通过求解雷诺平均Navier-Stokes方程，能够精确捕捉地形引起的气流加速、分离、再附着等复杂流动现象，从而生成高空间分辨率的风速、湍流及风向栅格数据集，为后续风机布局提供可靠的风资源输入。

2.2 可布机区域识别

在获得高精度风场分布后，需进一步结合工程、生态与法规等多重约束条件，划定实际可用于风机安装的区域。这一过程通常依托地理信息系统（GIS）平台进行空间叠加分析。首先，根据风机基础施工与吊装作业的技术要求，设定最大允许坡度阈值，一般控制在15度以内，部分适应性强的机型可放宽至20度。其次，排除存在地质灾害隐患的区域，如滑坡体、崩塌危岩、泥石流通道等，确保工程长期安全。再次，严格避让生态保护红线、基本农田、水源保护区、林地等敏感区域，符合国家土地利用与环境保护政策。此外，还需保证风机与周边道路、居民点、电力设施等保持规范要求的安全距离，并评估大型运输车辆与吊装设备的进场与作业空间是否充足。通过上述多因子约束条件的逻辑运算，最终生成一个二值化的可布机区域掩膜图，该图不仅限定了风机布局的物理边界，也为后续优化算法提供了可行解空间。

3 风机布局优化模型构建

3.1 优化目标函数

风机布局优化本质为组合优化问题，目标是在可布

机区域内选择N个风机位置，使目标函数最优。常用目标包括：

最大化年发电量（AEP）：

$$AEP = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K P_i(U_k) \cdot f_k \cdot 8760$$

其中 $P_i(U_k)$ 为第i台风机在风况k下的功率输出， f_k 为该风况频率。

最小化尾流损失：通过尾流模型（如Jensen、Gaussian、Larsen模型）量化风机间干扰。

最小化投资成本：考虑风机购置、基础施工、集电线路长度等。

在复杂地形中，更宜采用多目标优化框架，平衡发电收益与成本风险。

3.2 尾流模型适应性改进

经典的尾流模型，如Jensen线性扩张模型或Gaussian高斯分布模型，均建立在平坦、均匀来流的假设之上，其尾流中心线沿直线传播，扩张角恒定。然而，如前所述，复杂地形会显著改变尾流的传播路径与扩散特性。为提升尾流预测在复杂地形中的准确性，近年来研究者提出了多种改进策略。一种有效的方法是将CFD模拟得到的无风机背景流场作为尾流模型的输入风场，即采用CFD-Wake耦合方法^[3]。在此框架下，尾流不再沿固定方向传播，而是跟随CFD提供的局部流线方向演化，同时其扩张速率也可根据局部湍流强度动态调整。这种方法既保留了尾流模型计算效率高的优点，又融入了地形对流场的真实影响，显著提升了尾流损失估算的可靠性，为布局优化提供了更精准的物理依据。

3.3 优化算法选择

由于风机布局问题的解空间庞大且目标函数非连续、不可微，传统的基于梯度的优化方法难以适用。智能优化算法因其不依赖目标函数解析性质、具备强大全局搜索能力而被广泛采用。遗传算法（GA）通过模拟生物进化机制，在解空间中进行并行探索，具有良好的鲁棒性，但其收敛速度相对较慢。粒子群优化（PSO）算法结构简单、参数少，适合处理连续变量问题，在风机坐标连续化处理时表现良好。差分进化（DE）算法则以其高效的变异与交叉操作，在多峰优化问题中展现出优越性能。针对多目标优化场景，非支配排序遗传算法（NSGA-II）因其能有效维持种群多样性并快速逼近Pareto最优前沿，成为当前风电布局优化领域的主流选择。本文亦采用NSGA-II算法，通过定义合理的编码方式与适应度函数，求解在复杂地形约束下的多目标风机布局问题。

4 综合优化框架设计

基于前述理论与方法,本文构建了一个系统化的“四阶段”微观选址与风机布局优化流程。第一阶段为数据准备,系统收集项目区域的数字高程模型、土地利用现状图、现场测风数据、风机技术参数及电网接入条件等基础资料。第二阶段为核心风场模拟,通过运行WRF与CFD的耦合模型,生成覆盖全场、分辨率达10米的三维风速、湍流强度及风向分布数据集。第三阶段为可布机区域生成,利用GIS平台对地形坡度、地质稳定性、生态敏感性 & 工程可达性等多源数据进行空间叠加与逻辑运算,最终输出一个精确的可布机区域掩膜^[4]。第四阶段为多目标布局优化,将可布机区域内的候选点作为决策变量,以年发电量最大化和集电线路成本最小化为双优化目标,采用NSGA-II算法求解,生成一组非劣解构成的Pareto前沿。最终,结合项目的具体经济性指标(如平准化度电成本LCOE)及专家工程经验,从Pareto解集中筛选出技术可行、经济最优的最终布局方案。

5 讨论

5.1 技术挑战与局限

尽管本文所提出的方法在案例应用中取得了良好效果,但在推广应用过程中仍面临若干技术挑战。首先,高精度CFD模拟虽然物理机制完备,但其计算资源消耗巨大,单次全场模拟往往需要数天乃至数周的高性能计算时间,难以支持布局方案的快速迭代与实时调整。其次,风机尾流与复杂地形之间的非线性耦合机制尚未被完全揭示,现有耦合模型在极端地形(如深V型峡谷、孤立山峰)下的预测精度仍有待验证。此外,当前布局优化多基于历史气候数据,对极端天气事件(如下击暴流、强对流)的长期影响缺乏系统性评估,可能低估设备在极端工况下的安全风险。

5.2 未来研究方向

面向未来,复杂地形风电微观选址技术的发展应聚焦于

智能化与集成化。一方面,可探索利用机器学习方法,基于大量CFD模拟数据训练代理模型(Surrogate Model),以极低的计算成本替代部分高耗时的CFD计算,从而加速优化进程。另一方面,应推动数字孪生技术在风电场全生命周期管理中的应用,将微观选址、施工建设、运行监控与性能评估等环节打通,实现动态反馈与持续优化。最后,风电开发必须与生态环境保护协同推进,未来的研究应深度融合生态敏感性评价体系,在布局优化模型中内嵌生物多样性、水土保持等生态约束因子,真正实现绿色、可持续的能源开发。

6 结语

本文围绕复杂地形风电建设工程中的微观选址与风机布局优化这一核心问题,系统剖析了地形对风速、湍流及尾流等关键风资源特性的影响机制,构建了以高精度CFD风场模拟为基础、以多目标智能优化算法为核心的综合技术框架。所提方法在提升发电效益、控制工程成本及增强方案稳健性方面具有综合优势。研究表明,在复杂地形条件下,摒弃单一目标导向,采用融合技术、经济与风险考量的多维度优化策略,是实现风电项目高质量发展的必由之路。展望未来,随着高精度遥感、人工智能与高性能计算技术的深度融合,复杂地形风电开发将迈向更加智能、高效与可持续的新阶段。

参考文献

- [1]陈育聪.高原风电风力机微观选址特异性探索[D].昆明理工大学,2020.
- [2]罗晓刚.新疆戈壁滩风力发电场微观选址及风电机组选型设计[J].云南水力发电,2024,40(04):1-3.
- [3]杨小龙.考虑风机疲劳载荷的风电场布局优化研究[D].重庆大学,2024.
- [4]张思瑶,赵超,隋东,等.风电场流场特性及风机布局数值模拟研究[J].气象与环境学报,2021,37(02):101-106.