

风电开发复杂地形风资源评估方法

杨忠贤

(中能建广西开发投资有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要 复杂地形风电场风资源评估由于存在气流分离、湍流加剧和尾流扰动问题而不同于平坦地形, 普通的平坦地形的风资源评估方法并不能完全适用于复杂地形, 需要重新建立一套适合复杂地形风资源评估的技术路线。本研究分析了复杂地形对风场特性的影响, 从测风塔布设原则、遥感测风设备应用等多个方面探讨了测风方案设计与数据采集要点, 并且详细解析了数值模拟方法选型与应用要点, 以期为风电开发复杂地形风资源评估提供有益参考。

关键词 风电开发; 复杂地形; 风资源评估

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.021

0 引言

风能资源评估是风电项目可行性研究的重要基础, 其结果直接影响到机组选择、布置方式和经济效益的测算。平地风场一般采用线性化模型预报风能资源, 气流平稳, 风切变小、湍流强度弱; 而我国中东部以及西南地区山地、丘陵、峡谷等地形条件复杂, 由于地表起伏大, 坡度差多在 200 m 以上, 风场地面粗糙度相差极大, 气流受地形影响易产生绕流、分离、回流和强湍流现象, 造成风速分布极不均匀、风向突变和尾流恢复慢等情况, 如果仍采用平地进行风资源评估, 会导致电能输出预测偏差达 15% 以上, 进而影响项目投资决策^[1]。对此需要根据不同的地形特点, 建立具有较强的通用性和可控性的风资源评估系统。本文在总结了现有的风能资源评价方法以及工程建设经验的基础上, 提出了适合于复杂地形风电场的风资源评估方法。

1 复杂地形对风场特性的影响

复杂地形主要指地表高程变化剧烈、坡度大于 15°、存在山脊、山谷或孤立山体的区域。其对风场的影响表现如表 1 所示。

2 测风方案设计与数据采集

2.1 测风塔布设原则

在复杂地形中, 测风塔应覆盖风电场内主要地貌单元, 优先布设于山脊线、谷底、坡中及孤立高点等典型位置。测风塔高度不低于拟选风机轮毂高度的 80%, 通常设 80 ~ 120 m。每座测风塔至少设置三层风速仪与一层风向仪, 并配备温度、气压传感器用于空气密度修正。风速仪采用超声波或加热式机械式, 防冰冻、抗腐蚀。数据采样频率 1 Hz, 存储间隔 10 min, 连续测风不少于 12 个月。

2.2 遥感测风设备应用

遥感测风设备可以采用激光雷达 (LiDAR) 或声雷达 (SODAR) 在陡峭山地或交通不便区域增加测风点, 将 LiDAR/SoDAR 仪器设置在山顶或临时平台上, 测量高度为 50 ~ 200 m, 水平扫描获取每个方位上相应的风场剖面。同时应将遥感设备与邻近测风塔平行运行, 其二者具有良好的相关性 (≥ 0.95), 且斜率偏差不大于 $\pm 5\%$, 以用于风场建模。

表 1 风场特性的影响分析

类别	地形特征	风场影响	关键数据
地形定义	坡度 $> 15^\circ$, 含山脊 / 山谷	—	坡度 $> 15^\circ$
风速分布	气流加速 / 分离	山脊风速高谷底 30% ~ 50%	机位风速差 $\geq 2 \text{ m/s}$
风向稳定性	气流偏转 / 狹管效应	风向偏差 $> 30^\circ$, 出口有涡旋	偏差 $> 30^\circ$
湍流与风切变	地形扰动	湍流强度 18% ~ 25%	风切变 ≥ 0.3
评估难度	特性复杂	测风、建模、选址难度上升	—

2.3 数据质量控制

对原始测风数据应进行完整性检验、合理性检验和一致性检验，去掉大于 $0 \sim 50$ m/s的风速值、大于 $60^\circ / 10$ min的风向突变值以及因传感器故障导致的异常数据。同时使用线性插值或者相邻塔架数据进行内插，使每一年单月风速数据完整率达到 $\geq 90\%$ ，全年的数据完整率 $\geq 95\%$ ，然后将得到的数据运用 WindLogger 工具形成风况表。采用 12 方位划分风向扇区^[2]。

3 数值模拟方法选型与应用

3.1 线性模型适用边界

线性模型以势流方程为理论依据，假定气流不可压缩、无黏性、不分离。当地形坡度小于 12° 、高程起伏变化不大时，可以取得与观测比较接近的结果；但是，在山脊坡度大于 20° ，且背风波有气流回旋处，则由于模型不能体现出流动分离和再附着的特性，得到的风速值会较观测值相差较大；在工程上，在此地形条件下线性模型得出的年平均风速可能会大于或小于实测值 20% 以上，发电量也会随之出现相应的变化。在具有山地、峡谷或者孤立山体等地形比较复杂的地貌上，不能使用线性模型对风电场进行建模，在线性模型的基础上还需要采用更高的数值方法进行风场重构^[3]。线性模型不是万能的，用不好反而会误导判断。尤其是在大气特别不稳定（比如夏季午后）或者特别稳定（比如冬季晴朗夜晚）的时候，风场里乱流多、风速变化剧烈，线性模型“平滑流动”的假设就站不住脚了，算出来的结果往往不乐观。另外，现在很多风电场为了省地，风机排得很密，前后间距连五个轮毂高度都不到，这时前排风机的尾流还没散，后排就接着“吃尾流”，线性模型根本算不准这种相互影响，很容易高估发电量。因此，我们在做项目前期评估时，一定要先摸清地形是不是太平缓、风稳不稳定、风机如何排，保证结果可靠稳定。

3.2 非线性 CFD 模型原理与设置

非线性计算流体动力学模型通过数值求解三维瞬态 Navier-Stokes 方程，能够再现气流绕山、分离、回流及尾流演化等复杂现象。模型计算域在水平方向延伸至风电场边界外不少于五倍轮毂高度，垂直方向高度不低于三倍轮毂高度。网格划分在风机布设区域加密，水平单元尺寸控制在 $10 \sim 20$ m 之间，近地面边界层设置不少于 10 层渐密网格。湍流闭合采用 $k-\varepsilon$ RNG 或 $k-\omega$ SST 模型，二者对强剪切与逆压梯度流动具有较好的捕捉能力。入口边界给定风速剖面，按对数律或实测廓线输入；出口设为自由流出；地面设为

无滑移界面，粗糙度长度依据地表植被、裸露岩石或水体等覆盖类型选取，数值范围从 $0.01 \sim 1.0$ m 不等。在模拟风电场流场时，应考虑大气稳定度对风速廓线和湍流结构的影响。通常根据实测气象数据，将大气层结划分为中性、稳定或不稳定三类，分别采用对应的边界层参数进行计算。风机对气流的作用可通过致动盘或致动线方法简化表示：致动盘适合快速评估全场风速分布，致动线则能更真实地反映叶片尾流中的涡旋发展。计算时时间步长不宜过大，一般控制在 $0.01 \sim 0.1$ 秒之间，以保证数值稳定性。模拟过程中需关注速度和压力等关键变量的变化趋势，当其波动趋于平稳、不再明显下降时，可认为计算结果基本稳定，具备用于工程分析的基础。

3.3 模型验证与不确定性控制

模型输出的结果要与独立测风塔观测数据进行对比校验，从风电场中随机抽取 $2 \sim 3$ 座未参与建模工作的测风塔，并根据测风塔轮毂高度处长期观测数据取值，与相应位置处的模拟值对比分析，采用均方根误差和平均绝对误差指标评价其差异情况，要求均方根误差小于 0.8 m/s，平均绝对误差小于 0.6 m/s；若其误差超出上述标准时，重新调整网格分辨率、更换湍流模型或修改地表粗糙度参数。模型的不确定性是由于地形起伏真实性的数字高程模型的精度不高、入口风廓线不具有代表性以及湍流封闭假设带来的不确定性造成的。为控制模型不确定性，在一定的参数空间范围内取多个参数组进行参数组合模拟，通过敏感性分析找出影响最大的参数组作为优化目标，并用各参数组合下的多组结果分散程度来反映评估结果的可信区间^[4]。

4 微观选址与风场布局

4.1 风资源图谱生成

风资源图谱是应用经过验证的计算流体动力学模型，覆盖风电场规划区范围内的所有地区而形成；图谱输出内容为年平均风速、湍流强度、主风向频率和空气密度四个参数；空间分辨率为 25×25 m，能够体现局部地形造成的风场细节变化；图谱运用 GIS 平台进行绘制，不同参数分别以等值线或色阶的形式表示；高风速一般出现在山顶或山脊向上一定的高度范围内，低湍流区多出现于坡度较小且没有其他障碍物阻挡的平坦开阔区域，因此图谱可以用作微观选址的参考依据，用来排除一些不利于机组布设的位置，比如过低风速和过大湍流位置。同时，在进行图谱绘制时，将所有数据导出成网格点文件，供接下来进行机组布置时使用。

4.2 机组布置原则

风机位置优先选择山脊线迎风一侧，该区域气流稳定、风速较高，需避免在背风坡布置，因为气流分离易形成低速回流区；峡谷出口下游亦不设机位，防止涡旋引起载荷异常。沿主风向相邻风机间距不小于七倍叶轮直径，垂直主风向间距不小于五倍叶轮直径，以此控制尾流影响范围。在风向分散或地形复杂的区域，采用非规则排布方式，根据局部风向调整机位偏移，使上游风机尾流区避开下游风机扫风面。同时，结合地质勘察报告，核查每个拟定机位的基础持力层条件，排除存在滑坡、冲沟、软弱夹层等不良地质现象的点位，确保基础结构安全。

4.3 尾流模型选择

尾流影响计算主要采用非线性物理模型，如Larsen模型、Ainslie模型等，这些模型基于动量守恒和湍流扩散方程，可以反映尾流速度亏损沿程发展的过程以及尾流恢复的过程，且考虑地形对气流结构的影响。在山地环境中，由于大气稳定性较高、机械湍流较弱，其尾流恢复速度慢于平原地区，尾流影响距离长；在实际工程应用中，山地风电场年均尾流损失率为12%~18%，固定为这一数值进入年理论发电量计算流程。尾流模型的输入项为风机的功率曲线、推力系数、实测或者模拟的风向频率、地形高程值，输出项为每一个风机对应的尾流折减系数，用于逐机位修正发电量^[5]。

5 长期风况订正与发电量估算

5.1 长期订正方法

现场测风周期多为12~36个月，所得风速数据代表短期气候状态。为获得20年尺度的长期平均风况，采用相关分析法进行订正。该方法需选取一个参证气象站，其距离风电场不超过50km，地形特征相似，海拔高差小于200m，且盛行风向基本一致。利用测风塔与参证站在同期重叠时段的10分钟平均风速数据，建立线性回归方程，斜率与截距由最小二乘法确定，相关系数不低于0.7。随后，将参证站近20年的年均风速序列代入该回归方程，计算出风电场对应年份的长期风速序列，并求取其平均值，作为风资源评估的基准风速。订正结果受参证站代表性影响，若区域无合适站点，可采用再分析数据如MERRA-2或ERA5作为替代。

5.2 发电量计算

发电量计算以订正后的长期年均风速为基础。首先，根据实测风速频率分布拟合威布尔双参数模型，确定尺度参数与形状参数，进而计算各1m每秒风速区间的出现概率。其次，将各风速区间中值输入风机制造商提供的功率曲线，获得对应输出功率，乘以该

区间频率与全年小时数，得到理论发电量。随后，依次应用多项修正系数：尾流损失系数依据微观选址模型输出结果；空气密度修正按现场实测年均密度与标准密度1.225 kg/m³之比调整；功率曲线折减系数取0.95；设备可利用率系数取0.93。各项系数连乘后作用于理论发电量，最终得出年理论发电量。在复杂地形条件下，因风场模拟与测风代表性存在不确定性，该发电量结果的误差范围一般为正负8%至正负12%。

6 工程实例分析

某山地风电场位于西南某省，场区东西长6km，南北宽4km，海拔1800m至2300m，最大高差500m，坡度15°至35°。布设3座100m测风塔及2台激光雷达，测风18个月。采用Meteodyn WT软件建立CFD模型，计算域12×10×3km，网格总数850万，湍流模型k-ω SST。模型经3座塔验证，RMSE为0.72 m/s，MAE为0.55 m/s。风资源图谱显示，山脊线年均风速6.8 m/s，湍流强度19%；谷底风速5.1 m/s，湍流强度23%。最终布置24台3.6 MW机组，沿山脊非规则排布，主风向间距8D。经长期订正，年理论发电量328 GW·h，不确定度±10%。项目投产后首年实际发电量321 GW·h，偏差2.1%，验证评估方法有效性。

7 结束语

风电开发复杂地形风资源评估阶段，不同地形的评估参数选择存在差异性，故而在评估方面需综合考虑地形的运用价值与可行性。复杂地形下风资源评价应抛弃平地简化想法，而是通过利用“精细化测风、高保真模拟、针对性布局、严谨订正”的技术路线。同时，由于测风方案应覆盖地貌多样性，故而在风电开发复杂地形风资源评估时可通过CFD模型合理设置网格，并且在设置合理的湍流模型基础上结合实测数据验证，确保复杂地形下的风场模拟精度得到全面提升，为风电项目建设提供数据参考。

参考文献：

- [1] 陈洪胜.复杂地形风电场风资源评估精度提升研究[J].能源与节能,2019(04):63-64,68.
- [2] 赵章乐.复杂地形风电场风资源分析及风场选址[J].现代工业经济和信息化,2020,10(11):23-24,40.
- [3] 鹿浩,焦姣.风电场的选址与风能资源评估及其后评价[J].太阳能,2023(12):27-35.
- [4] 陈挺.陆上风电场测风塔建设要点的分析及建议[J].福建建材,2020(11):89-91.
- [5] 陈标,何建军,舒忠虎,等.覆冰影响的南方山地风电场风资源评估方法[J].湖南电力,2021,41(05):42-47,52.