

基于长期气象数据的风资源评估方法研究

谢育哲

华能新疆能源开发有限公司清洁能源分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：基于长期气象数据的风资源评估方法是提升风电开发科学性的关键路径。围绕数据完整性与时序特征构建评估体系，通过多尺度统计分析与概率模型刻画风速分布及变化规律，并结合地形修正与不确定性分析提高评估精度。结果表明，融合长期序列与多源数据能够显著增强风资源评估的稳定性与可靠性，为风电场选址与容量配置提供量化依据。

【关键词】：风资源评估；长期气象数据；风速分布；多源数据融合；不确定性分析

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.005

引言

风能作为清洁能源的重要组成部分，其开发利用程度直接影响能源结构转型的进程。风资源评估作为风电开发的基础环节，决定了项目的经济性与安全性。传统评估方法多依赖短期观测数据，难以全面反映风速的长期变化特征，进而影响决策准确性。引入长期气象数据能够更真实地刻画风资源的时空分布规律，但在数据处理、模型构建及结果校正方面仍存在复杂性。有必要系统探讨基于长期数据的评估路径，以提升风资源分析的科学与应用价值。

1 风资源评估中的数据基础与关键问题

1.1 长期气象数据的获取与质量控制

长期气象数据的获取是风资源评估的起点，其可靠程度直接影响后续风速外推、功率密度计算与场址判定的精度。实际工作中，数据来源通常包括地面气象站、测风塔、再分析资料及卫星遥感产品，不同来源在时间分辨率、测量高度和空间代表性上存在明显差异。为了保证评估基础的一致性，需要围绕观测周期、采样间隔、传感器精度和站点周边下垫面变化开展系统核查，并结合场址海拔、粗糙度等级和障碍物分布建立数据筛选标准，避免因原始资料混杂导致风资源特征失真。

质量控制是长期气象数据进入评估模型前不可缺少的技术环节，其核心在于识别异常值、修补缺测段并校正系统误差。针对风速序列中常见的突变、漂移、停测和极端离群问题，可采用时间一致性检验、空间一致性检验和概率分布拟合相结合的方法进行甄别，再利用相关站点回归、插值重建和分层订正完成数据补全。对于长期序列，还应关注仪器更换、站址迁移和环境改变带来的非气候突变，通过均一化处理提升资料可比性，使评估结果更能真实反映区域风资源水平。在实际分析过程中，可通过突变检验方法识别时间序列中的异常节点，并结合相邻站点数据开展对比分析，以区分人为因素与气候信号。针对不同观测阶段的数据差异，建立统一的校正系数，对风速序列进行分段修正与重构，从而保证数据在时间维度上的连续性与一致性。这类处理能够有效降低非气候因素干扰，提高长期风资源评估的科学性与稳定性。

1.2 风速时序特征与统计描述方法

风速时序特征分析旨在揭示长期气象数据中年际、季节、月际及日变化的波动规律，这是判断风资源稳定性和可开发性的关键依据。风速并非简单的随机变量，而是受到大气环流、地表热力条件和局地地形共同调节，表现出明显的周期性、间歇性与非平稳性^[1]。评估过程中需要从平均风速、极值风速、风向频率、湍流强度和风切变指数等指标入手，对不同时间尺度下的风能变化进行分解，识别高风时段与低风时段的转换特征，为机组选型和运行方案配置提供数据支撑。

统计描述方法决定了风资源由观测数据向工程参数转化的效率与精度。常用方法包括频率分析、变异系数计算、自相关分析和概率分布拟合，其中威布尔分布因参数含义清晰、适配性较强而被广泛用于风速特征刻画。对于长期序列，还可引入时间序列模型和趋势检验方法，分析风速波动的持续性与变化方向，并结合风功率密度、有效风时数及容量因子开展综合判定。通过多指标协同分析，能够识别资源丰富区，还能区分高风速但波动剧烈的区域与稳定输出能力较强的区域。在具体应用中，可结合容量因子、有效风时数及风速标准差等参数，对不同区域的风能品质进行细化判别。对波动性较大的区域，还需进一步评估其对机组疲劳载荷和电网调度的影响，而稳定性较高的区域则更有利于实现持续发电与高效运行，从而为风电项目布局提供更具针对性的依据。

1.3 复杂地形条件下的数据偏差处理

复杂地形条件下，风场流动会受到山脊抬升、峡谷收缩、坡面绕流及地表粗糙度突变等因素影响，导致观测数据与区域真实风能分布之间出现系统偏差。平原地区形成的经验参数往往难以直接适用于山地、沿海台地和丘陵场址，在风资源评估中必须充分考虑地形加速效应、尾流扰动和局地湍流增强对测风结果的影响。若忽视这些因素，极易造成平均风速高估或低估，进一步影响发电量预测、设备载荷判断及场址经济性评价，降低风电开发决策的科学性。

数据偏差处理的关键在于建立地形响应与观测数据之间的修正关系。实际评估中，通常将测风塔资料与数字高程模型、

地表覆盖信息和中尺度气象场结合,利用风场数值模拟、微观选址模型和垂直外推算法对不同高度、不同位置的风速进行订正。对于局部地形起伏显著的区域,还需引入粗糙度长度、零平面位移和地形坡度等参数,对风速廓线和风能密度进行分区校核。通过实测资料与模型结果相互验证,可有效压缩复杂地形带来的偏差范围,提高风资源评估结果的工程适用性。

2 基于长期气象数据的评估方法构建

2.1 多尺度风速分布模型建立

多尺度风速分布模型的建立,是长期气象数据转化为风资源评价结果的重要环节。风速在年尺度、季节尺度和日内尺度上具有不同的波动特征,若仅采用单一时间尺度进行描述,容易掩盖资源丰枯转换的真实规律。评估过程中通常以长期观测序列为基础,结合年平均风速、月变化系数、主导风向频率和功率密度等指标,对风速场进行分层分析,并通过概率分布函数刻画不同时间尺度下的风速离散程度。这样既能反映区域风能储量水平,也能揭示风速变化对风电机组利用小时数的影响。

模型构建还需要兼顾垂直方向与空间尺度上的变化特征。由于风速会受高度梯度、地表粗糙度和热力稳定度影响,测点数据必须通过风切变模型和对数风廓线进行外推,才能获得轮毂高度处更具工程意义的参数。对于地形差异明显的区域,可将中尺度气象模式与局地微观风场模拟相结合,建立时间分辨率与空间分辨率协同统一的分布模型。通过这种方式,能够提高对长期风资源丰度的识别能力,还能增强不同场址之间资源比较的科学性,为后续发电量测算奠定扎实基础。

2.2 多源数据融合与空间插值技术

风资源评估依赖的数据类型较为复杂,单一资料来源往往难以完整反映区域风场特征。地面气象站数据具备连续性优势,却存在测量高度有限、站点分布不均等问题;测风塔资料精度较高,但覆盖范围较小;再分析资料与遥感产品能够补充大尺度背景信息,却可能在局地风速刻画上存在偏差^[2]。多源数据融合成为提升长期风资源评估可靠性的关键技术路径。统一时间基准、空间坐标和数据格式,可将不同来源的信息整合为结构一致的基础数据库,增强风场特征识别的完整性。

空间插值技术则承担着由离散观测点向连续风资源分布面转换的任务,其结果直接关系到风电场选址与微观布局的准确程度。常用方法包括反距离加权、克里金插值和协同克里金模型,不同算法对空间自相关性和样本密度的适应能力存在差异。在复杂地貌区域,插值过程还需引入高程、坡向、粗糙度长度和地表覆盖类型等辅助变量,以减少单纯距离权重带来的误差。

2.3 不确定性量化与评估结果修正

长期气象数据的风资源评估并非单纯的数据计算过程,结

果中往往包含观测误差、模型误差和样本代表性不足等多种不确定因素。观测仪器精度、采样间隔设定、站点迁移、缺陷修补方法以及长期订正系数的选择,都会对最终风速均值、有效风时数和功率密度产生累积影响。若不对这些误差来源进行量化分析,评估结果虽然在数值上完整,却难以满足工程投资对风险控制的要求。需要建立不确定性识别体系,对关键参数的敏感程度、误差传播路径和结果波动范围进行系统判定,使资源评价更具可信度。

评估结果修正的目的,在于将理论模型输出进一步校准为更接近实际风场特征的工程参数。处理过程中可采用误差分解、蒙特卡罗模拟、置信区间估计和交叉验证等方法,对风速外推偏差、空间插值偏差及长期订正偏差进行综合修正。对于已投运或邻近场址,还可引入实测发电数据和机组运行参数开展反向校核,判断资源评估值与实际能量产出之间的偏离程度。经过量化与修正后,评估成果能够体现风资源储量大小,还能明确结果的稳定区间,为风电项目的投资测算和技术方案选择提供更加稳健的依据。

3 评估结果的应用与优化路径

3.1 风电场选址中的资源匹配分析

风电场选址中的资源匹配分析,核心在于把长期气象数据揭示的风能特征与场址自然条件、建设条件统筹比对。仅凭平均风速高低判断场址优劣,往往难以反映真实开发价值。评估中还需结合风向玫瑰图、功率密度、湍流强度、极端风速重现期以及风速年际波动幅度,对候选区域进行分级筛选。若场址主导风向稳定、有效风时数充足、风速频率分布集中,机组运行状态通常更平稳,发电效率和设备适配度也更容易达到预期。由此形成的资源匹配结果,能够为场址比选提供更具工程指向性的判断依据。

资源匹配并不局限于风资源本身,还需要将地形地貌、电网接入、交通运输和生态约束纳入统一分析框架。山地、戈壁、沿海等不同区域的风场结构差异明显,同等风速条件下,施工难度和运行维护成本可能存在较大差距。实际测算中,常将长期测风成果与地理信息系统、数字高程模型和土地利用数据叠加,识别机位布设密度、道路通达性和集电线路走向的可实施程度。通过资源禀赋与工程条件的综合匹配,可以避免出现风能指标较优但建设成本过高的情况,使选址结果更符合风电项目全生命周期的开发要求。

3.2 装机容量配置与发电潜力测算

装机容量配置建立在长期风资源评估成果之上,其关键不在于单纯扩大装机规模,而在于实现资源条件与设备容量之间的合理耦合。若容量配置偏大,可能导致机组间尾流损失加重,电网消纳压力上升;若容量配置偏小,则会削弱优质风区的开发效率^[3]。基于长期气象数据开展配置分析时,通常需要结合

轮毂高度风速、容量系数、可利用率、功率曲线匹配程度以及风速持续时间分布,测算不同机型、不同机位布设方案下的年等效满负荷小时数。这样得到的容量设计结果,更能体现资源条件与设备性能之间的协同关系。

发电潜力测算是检验容量配置合理性的核心环节,结果直接关系到项目收益预测和投资决策。测算过程中,不能只依据理论风能储量推算发电水平,还要考虑尾流衰减、机组停机损失、线路损耗、限电因素和运维效率等实际变量。工程上常通过长期订正后的风速序列输入能量评估模型,结合机组功率曲线、阵列布置参数和可利用小时数,形成年发电量与概率发电量区间。对资源稳定性较高、季节互补性较强的区域,还可进一步分析其出力特征与负荷需求之间的适配程度,从而提升装机方案的经济性与运行可靠性。

3.3 评估方法优化与精度提升策略

评估方法优化的重点,在于提高长期气象数据对实际风场特征的表达能力,减少模型假设与工程环境之间的偏差。传统方法多侧重风速均值和频率分布,难以充分刻画复杂下垫面、局地热力差异和极端天气过程对风资源的影响。为增强评估精度,需要在数据链条、模型链条和验证链条上同步完善。数据层面应提升样本连续性和时空代表性,模型层面应强化中尺度

模拟与微观流场计算的耦合,验证层面则应利用长期测风成果和邻近场址运行数据进行回代检验,使评估结果更贴近实际开发情境。

精度提升策略还体现在参数校准和误差控制机制的细化上。针对风切变指数、粗糙度长度、湍流参数和长期订正系数等关键变量,可通过分区建模、动态订正和交叉验证降低经验参数套用带来的失真。对复杂地形区域,可引入计算流体力学方法识别局部加速带、分离区和高湍流区,再将模拟结果与测风塔观测值进行偏差反演,逐步修正资源分布图。对于评估成果的输出形式,也应由单一指标转向多指标联合表达,兼顾风速水平、发电潜力、波动特征与误差区间,以提高风资源评估在选址设计和投资测算中的适用深度。

4 结语

本文围绕长期气象数据在风资源评估中的应用路径,系统梳理了数据获取、模型构建与结果应用的关键环节。通过多尺度分析、多源数据融合及不确定性量化方法的引入,提升了风资源评估的精度与可靠性。结合风电场选址与容量配置需求,强化了评估成果的工程适配性。整体分析表明,科学利用长期气象数据能够有效支撑风电开发决策,提高资源利用效率与项目运行稳定性。

参考文献:

- [1] 韩毅,刘玮,张丽辉,等.大型风电场实地测风数据精细化分析方法[J].科学技术与工程,2024,24(26):11271-11282.
- [2] 杨舒雯.多源数据融合的风能资源评估方法[D].华北电力大学(北京),2024.
- [3] 李庆雷,古丽格娜·海力力,孔婷,等.测风塔资料质量控制及效果检验评估[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(01):141-148.