

# 风电场代表测风塔选择方法分析

## ——以广西某山地风电场为例

余少梅

(中国电建集团城市规划设计研究院有限公司, 广东 广州 511455)

**摘 要** 我国复杂地形风电占比超 60%，风况异质性增加评估难度。测风塔代表性影响发电量评估，受海拔高差、风气候、遮挡效应制约。评估分定性与定量，依规范，复杂地形测风塔控半径 $\leq 2$  km、高差 $\leq 50$  m，本文依此选塔并实证。以广西某山地风电场为例，合理选择代表测风塔，可优化关键指标：年上网电量增加 412.4 万 kW·h、等效满负荷小时数增加 27.5 h，尾流减少 0.05%、机位点风速增加 0.06 m/s，以期能为提升经济效益与计算精度提供参考，进而保障其效益与稳定运行。

**关键词** 风电场；测风塔；测风塔代表性；定量评估

**中图分类号**: TM62

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.028

### 0 引言

在“双碳”目标驱动下，风电作为清洁低碳的可再生能源，已成为我国能源结构转型的核心力量。随着平原、草原等简单地形风电场开发趋于饱和，山地、丘陵等复杂地形风电场的开发占比逐年提升。据行业统计，2023 年我国新增风电项目中，复杂地形项目占比超 60%。然而，复杂地形下气流受地形抬升、绕流、峡谷效应等影响，风况时空异质性极强，导致风能资源评估难度显著增加。

测风塔作为风电场风能资源观测的核心基础设施，其“代表性”（即测风数据对风机机位风况的反映程度）直接决定了发电量评估的准确性，进而影响项目投资决策与收益测算。早期研究多聚焦测风塔选址的定性原则（如避开障碍物、覆盖主导风向），而近年来随着实测数据积累与定量分析方法的发展，学界开始围绕地形复杂度、空间参数（距离与海拔高差）、布设方案等维度展开深入研究。而本文根据风资源评估规范及前人研究结果，对代表测风塔的选择进行定量分析，并以实例进行佐证。

### 1 测风塔代表性的关键影响因素

测风塔对风机机位点的代表性受地形、风气候、数据质量及遮挡效应等多维度因素制约，不同因素在复杂地形与低风速场景下的影响权重存在显著差异。总结而言，影响测风塔代表新的因素主要有以下三种：

首先，海拔高差与水平距离的核心作用地形复杂度

直接决定测风塔的有效控制半径。朱金奎等<sup>[1]</sup>通过浙江山地风电场研究发现，平坦地形测风塔可覆盖周边 5 ~ 8 km，而复杂地形下仅能准确代表 2 ~ 3 km 范围，且海拔高差是核心限制因素——当东西山脊高差达 150 m、直线距离 5.7 km 时，测风塔对跨山脊机位点的代表性显著降低。这一结论在肖娜等<sup>[2]</sup>的湖南山地案例中得到验证：风机与测风塔距离 $\leq 300$  m、海拔高差 $\leq 50$  m 时，发电量测算误差最小（如 3#、6# 风机误差 $< 5\%$ ）；若高差超 100 m、距离超 2 km，误差则扩大至 10% 以上。王道欣等<sup>[3]</sup>进一步通过定量分析指出，海拔高差与测风塔代表性呈显著负相关（线性拟合 $R^2=0.61$ ），当高差从 10 m 增至 50 m 时，理论折减系数从 0.82 降至 0.70；而水平距离与代表性无明显相关关系（ $R^2=0.03$ ），仅在 2 km 范围内存在微弱关联。李林森等<sup>[4]</sup>针对云贵高原 36 座测风塔的研究则补充：随着海拔高差与水平距离增大，风速推算误差呈单调递增趋势，当距离超 15 km 时，误差绝对值较 10 km 内扩大 30% 以上。

其次，风气候相似性是测风塔代表性的另一关键维度。主要体现在主导风向、风能方向与大气稳定度的匹配度上。朱金奎等<sup>[5]</sup>的案例显示，浙江风电场 B 测风塔主导风向为 SSE，仅能准确代表同山体东部机位点（间距 $< 1.6$  km），而对西部 NNE 风向主导的机位点代表性失效。肖娜等<sup>[6]</sup>则强调，测风塔风能方向与山脊走向垂直时（如 1# 测风塔 NNE 风向与东西山脊垂直），对沿线风机的代表性最优，可减少地形隆升导致的风况偏差。大气稳定度的影响虽易被忽视，但在低风速

山地场景中尤为关键。刘志远等<sup>[7]</sup>指出, 低风速区域地表温度差异易引发局部大气稳定度变化(如断崖、密林区域), 导致测风塔与机位点的风速梯度偏差达  $0.2 \sim 0.6 \text{ m/s}/100 \text{ m}$ , 需在代表性判定中单独考。

最后, 遮挡效应包括地形遮挡与风机尾流遮挡, 前者在复杂地形中更为突出。肖娜等<sup>[8]</sup>发现, 2# 风机虽与测风塔距离仅 238 m、高差 18 m, 但因位于独立山包且山脊开挖较大, 发电量误差仍达 2%; 李林森等<sup>[9]</sup>则指出, 下风向低海拔区域(如东北部机位点)受主山脊遮挡, 风速推算误差较上风向区域高 15%。尾流遮挡虽可通过软件计算(如朱金奎案例用 Meteodyn WT 模拟尾流损失), 但测风塔若处于风机尾流区(如距离 < 3 倍风轮直径), 实测数据会被“污染”, 需在选址阶段规避。

## 2 测风塔代表性的评估方法

测风塔选取先需定性评估,核心是“相似性准则”,刘志远等提出五环节技术路线:(1)地形地貌相似(地表粗糙度、复杂度一致);(2)风气候相似(距离、海拔、大气稳定度匹配);(3)排除遮挡效应(无显著地形或人为遮挡);(4)数据质量达标(完整率、插补误差可控);(5)处理特殊情况(如支脉山脊单独设塔)。

定量评估聚焦“理论折减系数”与“推算误差”：王道欣等<sup>[10]</sup>提出公式( $L=W_{\text{实际}}/W_{\text{模拟}}$ )，验证得高差 $< 30\text{ m}$ 时 $L \geq 0.76$ （代表性良好），高差 $> 50\text{ m}$ 时 $L < 0.70$ （代表性失效），阈值严于规范；李林森等对比单塔与多塔，前者推算误差6.55%，后者降至5.05%且分布均衡；朱金奎等发现单塔全场折减系数22.7%（西部29.5%），双塔降至13.8%（西部15.9%），差值为代表性不足的额外误差，但定量评估主观性大、实施难。

依《风力发电场设计规范》(GB 51096-2015), 平坦风电场测风塔选中央, 控制半径 $\leq 5$  km; 复杂/丘陵风电场分区域设塔, 控制半径 $\leq 2$  km, 且测风塔与机位海拔高差 $\leq 50$  m。本文以山地风电场控制半径 $\leq 2$  km、高差 $\leq 50$  m为选塔标准并实践。

### 3 实例分析

本文以广西某山地风电场为例,进行代表测风塔的选择分析。该风电场装机容量 150 MW,前期经过宏观选址、微观选址、现场踏勘,共选择了 24 个机位,采用单机容量为 6.25 MW、叶轮直径为 220 m,轮毂高度为 160 m 的风机。风电场共设置了 22 座测风塔,其中机械测风塔 8 座,激光雷达测风塔 14 座。机位编号及测风塔编号信息表如表 1 所示。

表1 机位编号及测风塔编号信息表

机位编号	测风塔编号
T01	JX01
T02	JX02
T03	JX03
T04	JX04
T05	JX05
T06	JX06
T07	JX07
T08	JX08
T09	JG01
T10	JG02
T11	JG03
T12	JG04
T13	JG05
T14	JG06
T15	JG07
T16	JG08
T17	JG09
T18	JG10
T19	JG11
T20	JG12
T21	JG13
T22	JG14
T23	/
T24	/

(注:其中以T开头的点位为机位点,以JX开头的点位为机械塔,以JG开头的点位为激光雷达测风塔。)

从表 1 中可以看到机位点的分布比较分散, 测风塔的分布也比较分散。机位点主要分布在资源条件较好的区域。在进行发电量计算时, 如果不能合理地选择代表测风塔, 将会使发电量计算不准确。为此, 本文首先计算逐个机位点与测风塔的水平距离, 水平距离满足 2 km 的要求后, 再计算测风塔与机位点高差。通过计算分析, 选择 JX02、JX03、JX05、JX07、JX08、JG01、JG03、JG04、JG05、JG06、JG08、JG09、JG14 测风塔作为风电场的代表测风塔。该风电场机位总数 24 个, 具有代表性的机位数 20 个, 占比 83.3%。该风电场测风塔较多, 如果没有正确选择代表测风塔, 非

代表测风塔如果引入发电量的计算，有可能成为数据噪点，影响发电量的分析。因此，本文分析同样的机位在使用代表测风塔和使用所有测风塔数据下发电量、等效满负荷小时数、尾流、风速等的计算结果对比，以便得到代表测风塔影响下的一些定性结果（见表 2）<sup>[11]</sup>。

它不仅能够让发电量计算结果更贴合实际风资源情况，实现计算结果的优化，还能提升项目整体计算结果的精细度，为项目的投资决策、设备选型、布局规划等提供更为精准的数据支撑，从源头保障风电场项目的经济效益与长期稳定运行。

表 2 使用所有测风塔及使用代表测风塔情况下部分要素计算结果

对比要素	单位	使用所有测风塔计算结果	使用代表测风塔计算结果	差值
年上网电量	万 kW·h	28 055.030	28 467.320	412.40
年等效满负荷小时数	h	1 870.335	1 897.822	27.50
尾流	%	5.680	5.640	-0.05
测风塔平均风速	m/s	4.310	4.600	0.29
机位点平均风速	m/s	4.940	5.000	0.06

从表 2 计算结果的深度分析可知，在风电场规划与设计过程中，使用合理选择的代表测风塔，能够对项目关键指标产生积极影响，为项目经济效益与计算精准度的提升提供有力支撑。

在核心的发电量指标上，使用代表测风塔后，风电场的年上网电量实现了 412.4 万 kW·h 的增长。这一增长数额并非简单的数字变化，从项目经济效益角度来看，年上网电量的提升直接意味着风电场年度营收的增加，按照当前风电上网电价测算，这部分额外的电量将为项目带来一定的经济收益，进一步缩短项目投资回收期，增强项目的市场竞争力与抗风险能力。

与此同时，等效满负荷小时数随之增加 27.5 h。等效满负荷小时数作为衡量风电场设备利用效率的关键指标，其提升表明风电场的风机设备能够在更长时间内处于高效运行状态，设备的利用价值得到充分挖掘，有效降低了单位电量的固定成本分摊，提升了整个风电场的运营效率。

在风资源相关指标方面，尾流减少 0.05%，这一细微但关键的变化，体现出代表测风塔在风电场流场模拟计算中的精准性优势。尾流效应是影响风电场整体发电效率的重要因素，尾流的减少意味着风机之间的相互干扰得到更好控制，风资源能够更高效地转化为电能，避免了因尾流估算偏差导致的发电量损失。此外，机位点平均风速增加 0.06 m/s，看似微小的风速提升，结合风功率与风速的三次方关系，实则对风机的发电功率有着不可忽视的正向影响，进一步印证了代表测风塔在风资源数据采集与分析上的可靠性。

综合以上多维度指标的变化可知，在风电场项目前期规划与设计阶段，正确选择代表测风塔至关重要。

#### 4 结束语

本文通过分析前人代表测风塔选取方法及影响，得到代表测风塔选取的方法论，通过广西某山地风电场代表测风塔的选择，得到了代表测风塔影响下的定性分析结果，即正确选择代表测风塔至关重要。它不仅能够让发电量计算结果更贴合实际风资源情况，实现计算结果的优化，还能提升项目整体计算结果的精细度，为项目的投资决策、设备选型、布局规划等提供更为精准的数据支撑，从源头保障风电场项目的经济效益与长期稳定运行。

#### 参考文献：

[1] 朱金奎,姜婷婷,申新贺.测风塔代表性对复杂地形风电场风能资源评估的影响研究[J].风能,2019(12):64-68.  
 [2] 肖娜,杨翠兰,曾寰宇.测风塔代表性对各机位点综合折减的影响[J].科学技术创新,2020(17):41-42.  
 [3] 王道欣,蔡创彬,王金鹤.基于发电量的测风塔代表性影响因素定量分析[J].华电技术,2020,42(12):72-77.  
 [4] 李林森,罗磊,张明,等.基于相互验证方法的复杂地形条件下测风塔代表性研究[J].太阳能,2025(04):49-59.  
 [5] 同[1].  
 [6] 同[2].  
 [7] 刘志远,沈文婷,李良县,等.一种低风速山地风电场代表测风塔的选取方法[J].可再生能源,2018,36(06):935-941.  
 [8] 同[2].  
 [9] 同[4].  
 [10] 同[3].  
 [11] 王守峰,戚振亚,许卫东.风电场代表年订正方法研究[J].绿色科技,2022,24(18):237-240.