



REETC/TN010: 2022

在役风电场风资源评估方法指导文件

Guidance Document on Wind Resource Assessment Method of In-service Wind Farms

2022-10-18 发布

2022-10-18 实施

可再生能源专家技术委员会 发布

版权声明

本文为技术说明，不属于标准及规范性文件，可用于应对行业实际问题实施时提供执行依据，及行业制修订相关标准及规范性文件时提供参考。本文的著作权属于可再生能源专家技术委员会成员单位共有，任何成员单位不经其他成员单位同意不得直接或变相将本文全部或部分用于商业用途或市场宣传。对于违反此声明或者其他违法使用本文内容者，可再生能源专家委员会将依法追究其法律责任。

本文件起草召集人：胡高硕（联合召集人）、宁洪涛（联合召集人）、曹彬（机组自由流风速还原子课题召集人）、郝辰妍（机组数据风参提取子课题召集人）、蒋紫毓（多数据来源应用子课题召集人）、房杰（验证项目子课题召集人）

本文件主要起草人员：刘璐、薛浩宁、王聪、朱金阳、蔡继峰、石浩、付斌、陈鹏、安会成、马雪韵、周平、于殿富、李霄、耿福海、许扬、刘贵杰、蒋海波、关晓晴、张伟、朱良山、梁会森、马海鹏、易侃、田艳、张敬昂、刘玮、彭怀午、徐栋、胡义、王先阳、尹怡杰、雷航、强鹏科、刘河生、肖书敏、程刚齐、赵宏亮、夏天、许昌、黄国庆、闫渤文、彭留留、程旭、王林鹏、谢磊、李擎、张会阳、张越、王伟、盖峰、王锴琦、颜灵伟、代瑞婷、盛科、张亦澄、袁飞、王玉婷

目录

1、 目的及范围	1
2、 规范性引用文件	1
3、 术语及定义	1
4、 基础资料	1
4.1 评估项目要求	1
4.2 所需数据类型	1
4.2.1 风资源数据	1
4.2.2 机组运行数据	2
4.2.3 地形及点位数据	3
4.2.4 风电场及风电机组资料	3
4.3 不同订正模块对数据的需求	3
4.4 数据使用原则	4
4.4.1 测风塔使用要求及标准	4
4.4.2 风功率预测塔或风电场测试数据使用要求及标准	4
4.4.3 机组选择及数据使用要求及标准	4
4.5 数据处理原则	4
5、 评估内容	4
5.1 场址地形等级评估	5
5.2 风速订正	5
5.2.1 机组分类	5
5.2.2 一次修正	5
5.2.3 二次修正	6
5.3 湍流订正	6
5.4 风图谱订正	6
5.4.1 初始风流场建模	6
5.4.2 基于机组数据的风流场建模检验	7
5.4.3 风流场建模的改进及验证	7
5.4.4 获得最终风资源评估结果	9

附录 A 流程图	10
附录 B 完整案例	11
B.1 数据收集/处理	11
B.2 地形等级评估	12
B.3 机组数据处理、核查、分类	13
B.4 风速修正	14
B.4.1 一次修正	14
B.4.2 二次修正	15
B.5 图谱订正	16
B.5.1 微尺度风流场建模	16
B.5.2 原始流场仿真	16
B.5.3 虚拟气象数据仿真	16
B.5.4 加入机组数据进行仿真	17
B.5.5 中尺度模拟与中微尺度结合建模	17
B.5.6 风流场建模的改进及验证	18
B.5.7 最终风图谱选择	19
B.6 湍流订正	20

1、目的及范围

本文件主要针对正在运行的风电场的风资源评估。

本文件适用场景主要为以大代小、寿命评估、风资源后评估等。

2、规范性引用文件

下列文件在本办法的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本文件：

IEC 61400-12-2 Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry

GB/T 18709-2002 风电场风能资源测量方法

GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法

GB/T 18451.2-2012 风力发电机组功率特性测试

NB/T 31147-2018 风电场工程风能资源测量与评估技术规范

NB/T 31079-2016 风电功率预测系统测风塔数据测量技术要求

QX/T 74-2007 风电场气象观测及资料审核、订正技术规范

3、术语及定义

下列术语和定义适用于本文件。

(1) 在役风电场

已建成投运的风电场。

4、基础资料

4.1 评估项目要求

已运行至少为一个完整年的项目。

4.2 所需数据类型

4.2.1 风资源数据

(1) 前期测风塔数据

风电场在运行前后的规划场区及附近的所有测风塔数据（原始数据应至少包括 10 分钟平均风速、风向、风速标准差、风速最大值、风速最小值）。测风周期应至少满足一个连续完整年，且数据有效率应达到 90%以上。

应收集上述所有测风塔的安装报告，内容包括测风塔坐标（含坐标系）、测风塔安装时间、运行时间、维护变迁、测风塔故障情况、原因分析、测风塔高度、仪器安装高度、设备

型号、直臂指向、设备标定报告、风向标零刻度线指向等，并说明指向方向是磁北还是真北。

(2) 风功率预测塔数据

应收集风电场运行阶段场区内的风功率预测塔信息，其中包括原始数据、测风塔坐标、测风塔实地照片、周边机位编号、测风塔安装时间、运行时间、维护变迁、测风塔故障情况和原因分析、测风塔高度、仪器安装高度、设备型号、直臂指向、设备标定报告、风向标零刻度线指向等，并说明指向方向是磁北还是真北。应收集风功率预测塔附近植被生长情况和季节变化情况。

(3) 周边气象站数据

应收集风电场场址周边长期气象测站近 30 年资料，资料应满足《GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法》中 4.1.2 中的要求。

(4) 中尺度再分析数据

应收集场区内中尺度数据（如 MERRA2、ERA5 等），数据应包括位置坐标、风速、风向、温度等时间序列（逐十分钟或逐小时）的数据。

(5) 风电场测试数据

除风功率预测塔外，在风电机组运行期间，使用其他设备测试过风资源情况的数据，例如雷达数据等。

或为了更准确的分析风电场风资源情况，包括发电量和机组适应性等，如有必要应选择适合的位置安装激光雷达进行一定时间的测风数据收集。激光雷达安装位置和测风周期根据具体项目情况要求制定。

数据应包括：位置坐标、测风高度、雷达周边环境照片、10min 和秒级的风速数据（垂直风速、水平风速）、风速的标准偏差、风向数据、风向标准偏差等数据信息，主要用来订正机舱风速。

4.2.2 机组运行数据

(1) 秒级数据

现场风电机组运行秒级数据从后台 SCADA 系统中导出，时间长度要求风电场并网日期起至今。宜为 10s 以内。

(2) 10min 数据

10min 平均数据从中控平台输出，变量包括各台机组平均风速、最大风速、风速标准差 SD、平均网侧有功功率、平均理论有功功率、发电量、平均环境温度、消耗电量、发电机转

速平均值、机舱加速度、机舱位置、发电机温度、平均风向角、平均桨叶角、可利用率、风电机组运行状态、限功率标志位等。

其中平均风速、风速标准差 SD、平均网侧有功功率、风电机组运行状态、限功率标志位为必要文件。

4.2.3 地形及点位数据

项目区域且向外延伸 2 km 范围内新近实测的 1: 2000 (或 1: 5000 (简单地形)) 的电子版全要素地形图和纯等高线图 (AutoCAD 形式)。地形图的等高距不宜大于 5 m。

应提供与地形图同坐标系的风电场内风电机组、升压站、测风塔、气象站、障碍物及其它相关的物体的坐标及海拔。应提供环境 (测风塔和风电场) 照片。

4.2.4 风电场及风电机组资料

(1) 风电场基本介绍

描述风电场所处位置、机型、台数、容量、全容量并网时间等基本信息。

(2) 机组坐标编号

风电场各机位点的详细坐标与编号, 描述机组的准确地理位置。各机位点坐标的坐标系应与地形图一致。

(3) 周边风电场机组位置和坐标

需提供该风电场周边邻近风电场的机组数量、机位点坐标、机组型号、轮毂高度、风电场空气密度下的功率曲线及推力系数、全容量并网时间等信息, 用于评估周边风电场对项目的影响。

(4) 机组资料

应收集机组参数表及说明文档。

(5) 风电场地理环境变化资料

若风电场覆盖范围内, 存在较大地形变化记录, 应进行收集, 如露天煤矿开采、山林绿化及周围高大建筑修建等。对于植被变化应记录风电场建成前后的季节或年度变化情况。

4.3 不同订正模块对数据的需求

表 1 不同订正模块对数据的需求

数据分类		风速一次修正	风速二次修正	湍流订正	风图谱订正
风资源数据	前期测风数据				√
	周边满足条件的同期测风塔数据 (风功率预测塔)		√	√	√

	周边气象站数据				
	长期气象数据				√
	风电场测试数据				
机组运行数据	秒级数据				
	机组 10min 数据	√	√	√	√
地形及点位数据	地形及点位数据	√	√	√	√
风电场及风电机组资料	风电场及风电机组资料	√	√	√	√

4.4 数据使用原则

4.4.1 测风塔使用要求及标准

应按照现行标准《风电场风能资源测量方法》GB/T 18709 和《风电场气象观测及资料审核、订正技术规范》QX/T 74 对测风塔的可用性进行判断。

4.4.2 风功率预测塔或风电场测试数据使用要求及标准

应核实测风设备的实际位置。且风功率预测塔或测试数据的位置应满足：至少 50% 的风频不受障碍物影响。风功率预测塔的位置应符合《GB/T 18451.2-2012 风力发电机组功率特性测试》中的标准。

风功率预测塔的性能、测量及数据合理性检验应满足《NB/T 31079-2016 风电功率预测系统测风塔数据测量技术要求》中的要求。

数据要求：应收集与运行期风电机组的同期数据。数据时长至少满足一个连续完整年。

4.4.3 机组选择及数据使用要求及标准

(1) 机组选择的要求：同 4.4.2 测风塔使用要求。同时需核实每个机位点的真实位置坐标。

(2) 数据要求：运行数据周期要求至少一个完整年以上，时段宜选择近期运行时段。数据类型应满足 4.2.2 机组运行数据的需求。

4.5 数据处理原则

4.5.1 测风塔数据处理原则

测风塔数据处理方法应参照《GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法》中的数据
处理标准进行。

4.5.2 机组数据处理原则

- (1) 数据合理性：应剔除异常值。
- (2) 数据插补：利用机组之间的相关性进行风速插补。

5、评估内容

5.1 场址地形等级评估

参照《IEC 61400-12-2 Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry》中第六章 Preparation for performance test。

5.2 风速订正

5.2.1 机组分类

在进行风资源分析前,应针对风电场存在不同机型的情况和相同机型参数设置不统一的情况对机组进行分组计算。分组后的机组作为进行机组间风速订正和湍流订正的单元。

针对 4.2.2 章节中所述 10min 采样间隔数据和机型参数进行机型分组。需核查各机组的如下数据:

- a) 机型
- b) 塔架高度
- c) 实际切入转速和额定转速
- d) 实际 K_{opt} 系数

根据数据核查的结果将机组按照以下优先级进行分组:

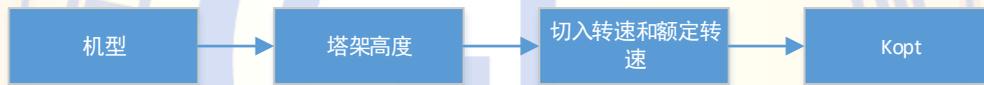


图 1 风电机组类型分组原则

5.2.2 一次修正

- (1) 计算全场平均功率曲线

针对相同机组类型的风电机组计算其平均功率曲线 $PowerCurve_{avg}$ 。

- (2) 计算机组在最优 CP 段风速区间的平均功率

主要针对变桨距机组,大多机组可分析风速段为 4m/s~9m/s。下述内容均以 4m/s~9m/s 风速区间作为示例进行描述。

利用当前机组的功率曲线与机组 4m/s~9m/s 的风频求得机组在此风速区间的平均功率

P_{inner} 。

- (3) 计算机组在 4m/s~9m/s 区间的理论平均风速

将步骤 (2) 中计算得到的 P_{inner} 插值到平均功率曲线 $PowerCurve_{avg}$ 上,得到该机组的理论平均风速 v_{theory} 。

(4) 计算一次修正系数

$k_1 = v_{theory} / v_{real}$, v_{real} 为机组在 4m/s~9m/s 区间的平均机舱风速。

(5) 机舱风速的一次修正

$$Speed_{first-adjust} = Speed_{nacelle} \cdot k_1$$

5.2.3 二次修正

选择测风塔不受障碍物遮挡的扇区为有效扇区，区分机组运行状态（并网状态、非并网状态、停机状态），针对不同机组运行状态的时间点，计算一次修正后的机舱风速 $Speed_{first-adjust}$ 与测风塔相同高度层的风速 $Speed_{tower}$ 的相关性，若相关性 R^2 大于 0.81，则可进行机舱风速的二次修正。修正步骤如下：



图 2 风速二次修正流程

5.3 湍流订正

湍流订正时应区分风电机组状态：正常并网状态、非正常并网状态、停机状态。数据主要基于 5.2.3 章节中已经进行风速订正后的风电机组数据。具体为：

- (1) 根据风电机组状态筛选三种状态下的风电机组数据；
- (2) 在有效扇区内，获得修正后的机舱风速 $speed_{two-adjust}$ 与同时期的原始机舱风速 $speed_{nacelle}$ 的线性相关关系 $speed_{two-adjust} = a_2 \cdot speed_{nacelle} + b_2$ ，得到斜率 a_2 和截距 b_2 ；
- (3) 其对应的风速标准差 $SD_{adjust} = SD_{nacelle} * a_2$
- (4) 修正的平均湍流为：

$$I_{adjust} = SD_{adjust} / speed_{two-adjust} = SD_{nacelle} * a_2 / (a_2 \cdot speed_{nacelle} + b_2)$$

(5) 对不同的状态依次进行上述 (2)~(4) 中的修正计算，得到各状态下的湍流值，合并得到评估时段的湍流时序。

其中修正参数 a_2 和 b_2 可应用于同类风电机组并网状态下的湍流修正中。

5.4 风图谱订正

5.4.1 初始风流场建模

基于测风塔实测风流数据（可以使用前期测风塔数据或风功率预测塔数据，需关注与后

续步骤用来对比验证的机组数据的时间一致性,如时间不一致可采用合理的订正方法进行调整)、地形高程数据、粗糙度数据,采用行业认可的风流场模型,对风电场区域进行流场模拟计算。微观风流场模型的合理性检验应至少包括:

- 地形、粗糙度数据的质量,并确保其覆盖微观风流场模型的计算范围
- 计算区域设置的合理性
- 流场模拟参数设置的合理性(网格参数、风向扇区步长等)
- 流场模拟的收敛质量

可结合测风塔实测风速垂直廓线,对风流场微观建模的粗糙度和/或大气稳定度模型进行校正。

经过模拟计算,得到机位点轮毂高度处考虑尾流效应的平均风速。

5.4.2 基于机组数据的风流场建模检验

比较上述得到的机位点平均风速与 5.2.3 章节得到的机组订正后风速,评估风速模拟误差。如果误差在可接受范围内,则可忽略 5.4.3 章节的要求。否则,可参照 5.4.3 章节进行改进及验证。

5.4.3 风流场建模的改进及验证

5.4.3.1 结合虚拟测风塔进行仿真

此方法适用于:场区部分区域仿真结果风速变化趋势与实测风速变化趋势差异较大的情况。可通过加入该区域的虚拟测风塔进行重新仿真。

注:使用虚拟测风塔是气象模拟数据在微观流场模型中的简化应用方式,受气象模拟数据的空间尺度影响,可能存在较大局限,应谨慎使用。

5.4.3.2 加入机组数据进行仿真

此方法适用于:场区部分区域仿真结果风速变化趋势与实测风速变化趋势差异较大的情况。此方法有两种应用方式:

- (1) 仅加入机组数据进行仿真,具体为:

将已进行机舱还原后的机组风速数据作为 WT 仿真的输入,该风速为受到尾流影响后的风速,因此在进行结果分析时,建议将 WT 输出的尾流前风速视为常规尾流后风速。

注:该方法适用于不对机组位置、机组类型做任何调整,且仅关注机组轮毂高度处风资源评估结果的情况。

- (2) 机组数据结合测风塔数据进行仿真,具体为:

选择 90%以上风向扇区方向不受障碍物遮挡的风电机组作为仿真参考点，将其订正后的风速序列结合测风塔数据加入 WT 中进行仿真。

5.4.3.3 中微尺度耦合

在微尺度风流场模型中引入中尺度气象数据，采用中微尺度结合的方法建模，是改善微尺度模型的有效途径之一。

中尺度数据是通过针对风电场所在区域的中尺度模拟得到的。中尺度模拟的典型水平网格分辨率为 3 km，距离地表 200 m 以下高度不少于 4 层模式层。建议使用高分辨率地形数据（如 SRTM 90 m）作为中尺度模拟地表高程信息。中尺度模拟的时间段应设置为至少一年，时间步长通常为 1 小时。中尺度模拟的质量应得到论证。中尺度模拟的输出形式是特定位置、高度上的风速、风向时间序列数据。

中尺度数据与微尺度风流场模型结合的关键是，在微尺度模型中引入中尺度数据提供的气象背景信息。中尺度数据与微尺度风流场模型结合应合理地实现两个模型的尺度衔接。通过中尺度单元的方式，将中尺度流场作为一定空间范围内的微观流场的平均值（而非将中尺度数据作为某一虚拟点的风流参数），并在微尺度模型中进行降尺度计算是一个可行且高效的办法。

中尺度单元的大小应等于中尺度模拟的水平网格分辨率，通常需要引入多个中尺度单元数据以完全覆盖风电场所在区域，如下图。

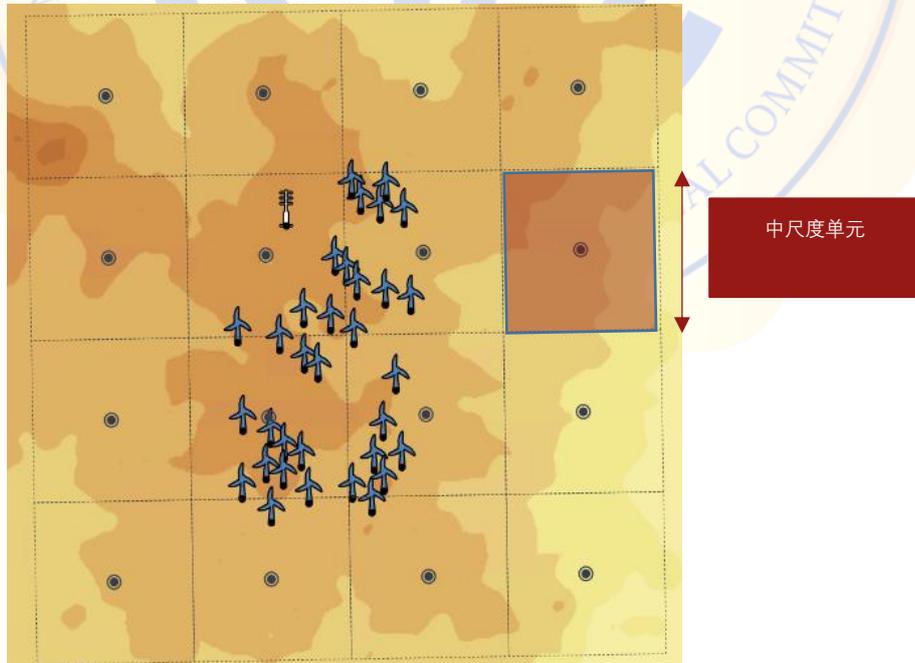


图 3 中尺度单元示例

用于降尺度计算的中尺度数据的最佳高度一般不低于 200 m。

将中尺度数据和微尺度流场模型结合，进行降尺度计算。在使用多个中尺度数据单元的情况下，特定目标点位的风流参数的计算应考虑与目标点位距离最近的若干个中尺度单元数据或一定距离范围内的所有中尺度单元，并根据距离设置每个中尺度单元的影响权重。应用尾流效应模型，得到机位点轮毂高度处考虑尾流效应的平均风速。

比较上述得到的机位点平均风速与 5.2 章节得到的机组订正后风速，评估风速模拟误差。如果误差在可接受范围内且优于 5.4.1 章节得到的初始风流场建模误差，则可作为最终的风资源评估模型。否则，可参照以下步骤进一步改进模型。

- (1) 比较机位点平均风速与 5.2 章节得到的机组订正后风速，评估风速修正系数（根据机位点风速模拟误差的空间分布特征，风速修正系数可能与中尺度单元的位置无关或有关）。
- (2) 使用修正系数对中尺度数据进行修正。
- (3) 将修正后的中尺度数据代入微尺度流场模型进行降尺度计算，并应用尾流效应模型，得到机位点轮毂高度处考虑尾流效应的平均风速。
- (4) 比较（3）得到的机位点平均风速与 5.2 章节得到的机组订正后风速，评估风速模拟误差。如果误差在可接受范围内且优于 5.4.1 章节得到的初始风流场建模误差，则可作为最终的风资源评估模型。否则应重新执行以上步骤。

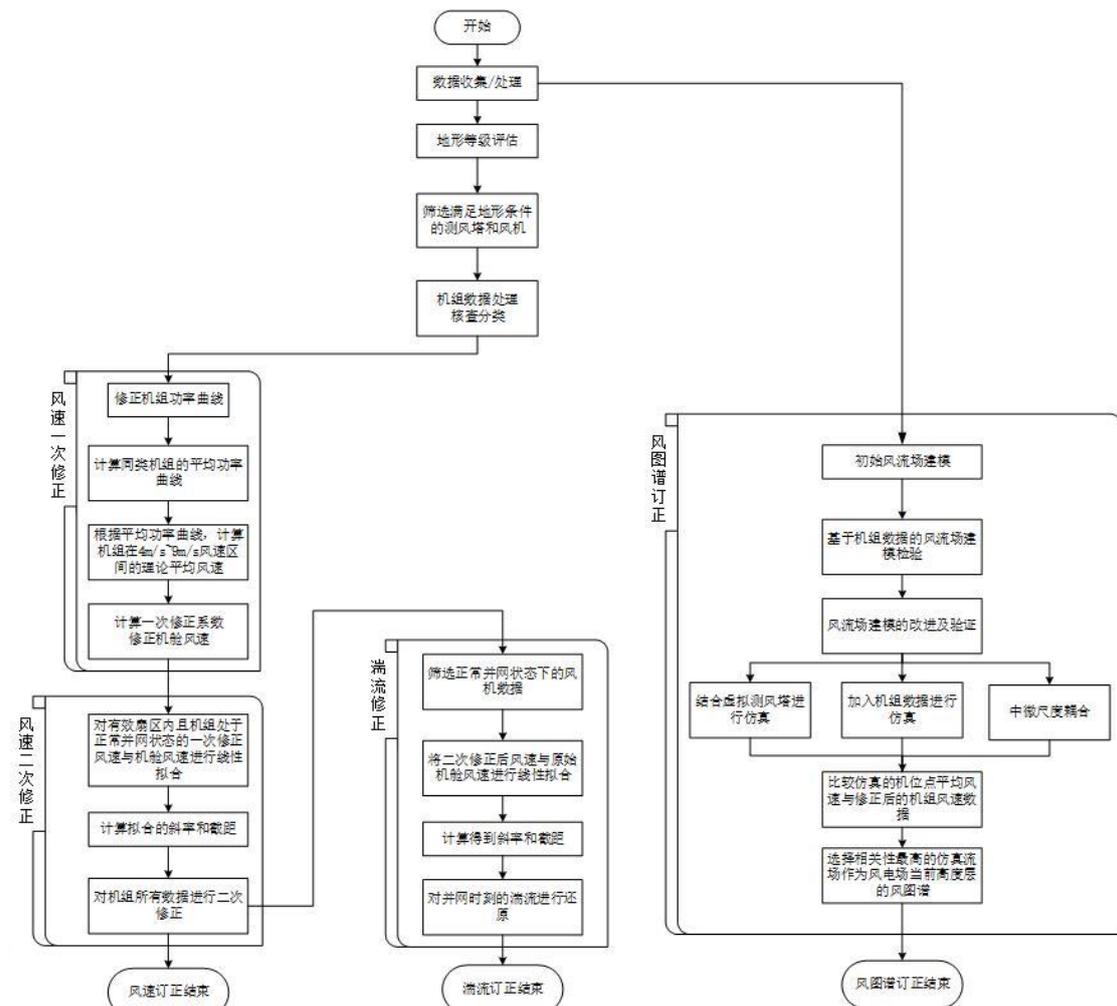
5.4.4 获得最终风资源评估结果

针对一个特定的风电场，根据 5.4.1、5.4.2 和 5.4.3 章节的分析情况，用于最终风资源评估的建模方法可能是以下五者之一：

- 初始风流场建模（基于测风塔数据和微观流场模型）
- 基于虚拟测风塔数据和微观流场模型的建模
- 基于机组数据和微观流场模型的建模
- 基于多中尺度单元数据和微观流场模型的建模
- 基于修正后的多中尺度单元数据和微观流场模型的建模

使用相应的风资源建模方法获得所关注的点位或区域内的风资源评估结果。

附录 A 流程图



附录 B 完整案例

B.1 数据收集/处理

(1) 某风电场获得数据清单：

表 2 风电场收资清单

数据分类		数据类型	是否收集
风资源数据	前期测风数据		√
	周边满足条件的同期测风塔数据 (风功率预测塔)		√
	周边气象站数据		
	长期气象数据		
	风电场测试数据		
机组运行数据	秒级数据		
	机组 10min 数据	平均风速	√
		风速标准差 SD	
		平均网侧有功功率	√
	风电机组运行状态	√	
地形及点位数据	地形及点位数据	点位坐标	√
		实测地形图	
风电场及风电机组资料	风电场及风电机组资料		√

(2) 数据处理

表 3 风电场数据情况

	采集时间段	应用时间段	数据完整率
风功率预测塔	2020.02.01-2022.01.01	2021.01.01-2021.12.31	98%
1 号风电机组	2020.01.30-2022.03.01	2021.01.01-2021.12.31	99%
2 号风电机组			99%
3 号风电机组			99%
4 号风电机组			99%
5 号风电机组			99%
6 号风电机组			99%
7 号风电机组			99%
8 号风电机组			99%
9 号风电机组			99%
10 号风电机组			99%
11 号风电机组			99%
12 号风电机组			97%
13 号风电机组			98%
14 号风电机组			99%
15 号风电机组			99%

	采集时间段	应用时间段	数据完整率
16号风电机组			99%
17号风电机组			98%
18号风电机组			99%
19号风电机组			97%
20号风电机组			99%
21号风电机组			99%
22号风电机组			99%
23号风电机组			99%
24号风电机组			98%
25号风电机组			97%
26号风电机组			99%
27号风电机组			99%
28号风电机组			99%
29号风电机组			99%
30号风电机组			99%
31号风电机组			99%
32号风电机组			99%
33号风电机组			99%

风电机组与风功率预测塔的数据完整率均超过 90%，数据可用，无需插补处理。

B.2 地形等级评估

根据地形特性，选择主风向区间 303° ~348° 作为本次研究的风向。该方向上风功率预测塔及各风电机组的地形等级为：

表 4 风电场地形等级评估

编号	离塔距离(*D)	高程(m)	最小坡度	最大坡度	平均坡度	斜坡地形等级	RIX_004	RIX_006	RIX_008	起伏地形等级	最终地形等级
风功率预测塔		620	-5.71	4.57	0.17	1	0	0	0	0	1
A0	13.8	625	-6.84	6.84	-0.49	1	0	0	0	0	1
A1	14.6	630	-4.57	4.57	-0.52	1	0	0	0	0	1
A2	16.7	643	-6.84	2.29	-0.86	1	0	0	0	0	1
A3	17.6	641	-6.83	4.57	-0.57	1	0	0	0	0	1
A4	20.2	646	-5.71	4.57	-0.43	1	0	0	0	0	1
A5	23.2	653	-5.71	6.84	-0.54	1	0	0	0	0	1
A6	26.6	661	-5.71	6.84	-0.63	1	0	0	0	0	1
A7	30.1	666	-6.84	4.57	-0.66	1	0	0	0	0	1
A8	33.7	672	-5.71	4.57	-0.66	1	0	0	0	0	1
A9	37.4	679	-6.84	4.57	-0.66	1	0	0	0	0	1
A10	41.1	689	-10.20	3.43	-1.06	1	0	0	0	0	1
B1	7.7	611	-7.97	6.84	0.00	1	0	0	0	0	1
B2	5.0	614	-6.84	6.84	0.54	1	0	0	0	0	1
B3	3.8	620	-5.71	5.71	0.57	1	0	0	0	0	1

编号	离塔距离(*D)	高程(m)	最小坡度	最大坡度	平均坡度	斜坡地形等级	RIX_004	RIX_006	RIX_008	起伏地形等级	最终地形等级
B4	6.1	628	-6.84	5.71	0.06	1	0	0	0	0	1
B5	9.5	632	-6.83	4.57	-0.34	1	0	0	0	0	1
B6	13.3	639	-5.71	4.57	-0.66	1	0	0	0	0	1
B7	17.2	644	-6.84	3.43	-0.77	1	0	0	0	0	1
B8	21.1	650	-6.84	5.71	-0.77	1	0	0	0	0	1
B9	25.0	657	-5.71	3.43	-0.89	1	0	0	0	0	1
B10	29.0	662	-5.71	3.43	-0.74	1	0	0	0	0	1
B11	33.0	669	-5.71	4.57	-0.91	1	0	0	0	0	1
B12	36.9	676	-9.09	3.43	-1.46	2	0	0	0	1	3
B13	40.3	672	-10.17	10.20	-0.74	2	0	0	0	1	3
C1	11.5	614	-7.97	7.97	-0.46	2	0	0	0	1	3
C2	6.8	622	-6.83	7.97	0.20	1	0	0	0	0	1
C3	9.2	626	-4.57	4.57	0.11	1	0	0	0	0	1
C4	12.4	630	-7.97	4.57	-0.57	1	0	0	0	0	1
C5	16.0	634	-7.97	4.57	-0.86	1	0	0	0	0	1
C6	19.8	637	-6.84	4.57	-0.57	1	0	0	0	0	1
C7	23.6	644	-6.84	5.71	-0.86	1	0	0	0	0	1
C8	27.5	650	-5.71	3.43	-1.03	1	0	0	0	0	1
C9	31.4	658	-10.20	6.84	-1.40	1	0	0	0	0	1

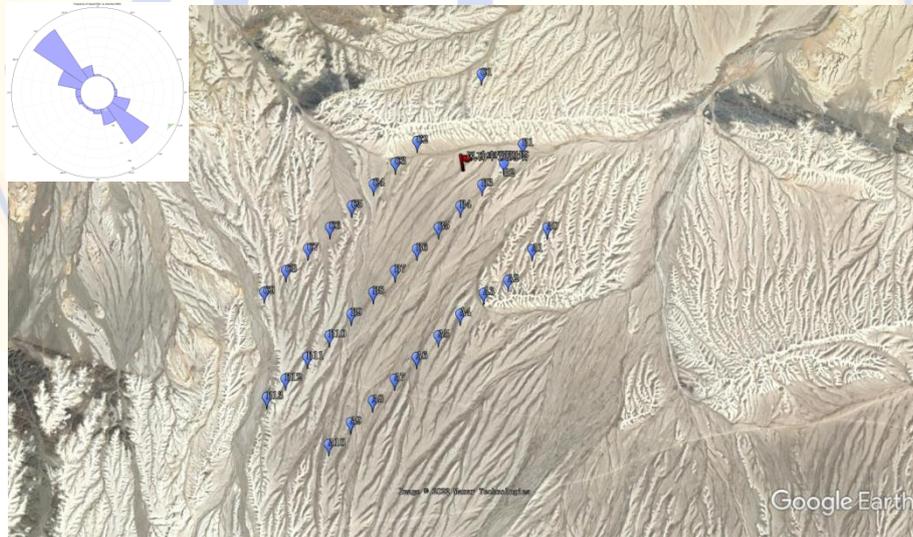


图 4 风电场风电机组排布情况

根据地形条件及相对位置关系，选择 B3（14 号）风电机组作为订正机组。

B.3 机组数据处理、核查、分类

(1) 机型、塔架高度

机型及塔架高度一致，均为 WTG82-1.5 机型，轮毂高度为 70m。

(2) 实际切入转速和额定转速

由于未收集到机组转矩数据，因此无法计算。

(3) KOPT 系数

由于未收集到机组对风角数据，因此无法计算。

基于现有数据，暂将全场机组并为同类机组进行后续计算。全场风速及湍流的订正，可采用 B3 机组的订正参数。

B.4 风速修正

B.4.1 一次修正

由于未收集到机组的能量控制模式数据，无法判断机组是否限电，因此先基于风电机组状态为并网状态的数据进行功率曲线的计算分析。通过计算各机位点的功率曲线，发现 7 号(A06)、16 号(B05)、21 号(B10)、27 号(C03)风电机组的功率曲线无异常，限电不明显，因此采用上述四台机组的功率曲线作为全场平均功率曲线进行计算。

得到各机位点在 4-9m/s 风速区间的平均风速及平均功率散点图：

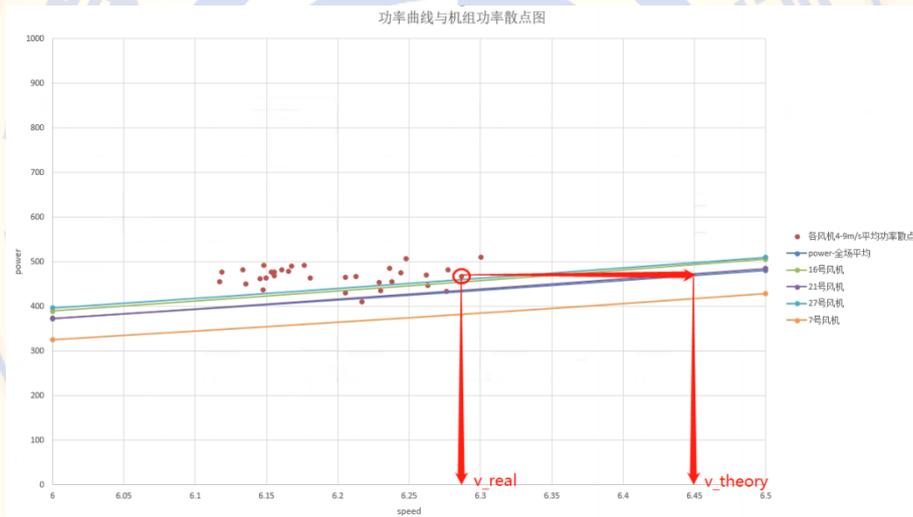


图 5 一次修正示意图

将各机组的在 4~9m/s 的实际功率在全场平均功率上插值，得到在全场平均发电水平下的 4~9m/s 的理论风速，如上图所示，该机组的一次修正系数为 $k_i = v_theory / v_real$ 。

基于上述方法，完成全场各机组的一次修正，见图 6。

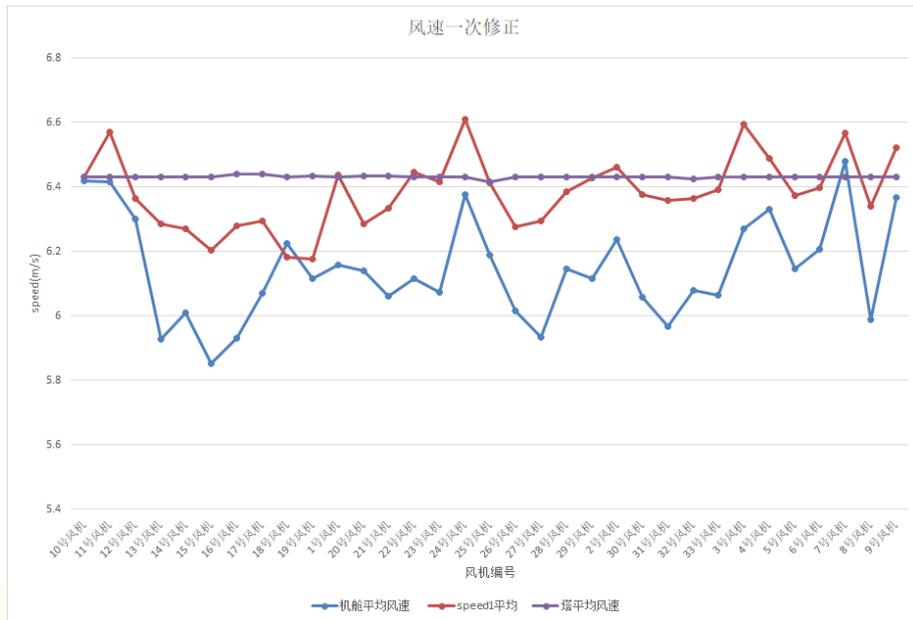


图 6 一次修正结果

B.4.2 二次修正

针对 303° ~348° 扇区的一次修正风速与测风塔风速进行相关性分析，从而对一次修正后的风速进行二次修正，得到下图，其中 B2(13 号)风电机组为验证风电机组。可以看到，应用该方法后，B2 机组的机舱风速偏差从 0.88m/s 缩小至 0.07m/s。

表 5 风速修正结果（单位：m/s）

	机舱风速	一次修正	二次修正	测风塔风速
B3(14 号)	6.84	7.14	7.67	7.67
B2(13 号)	6.79	7.2	7.74	7.67

B.5 图谱订正

B.5.1 微尺度风流场建模

使用 SRTM30m 地形高程数据和 ESA 粗糙度数据建立风电场模型。

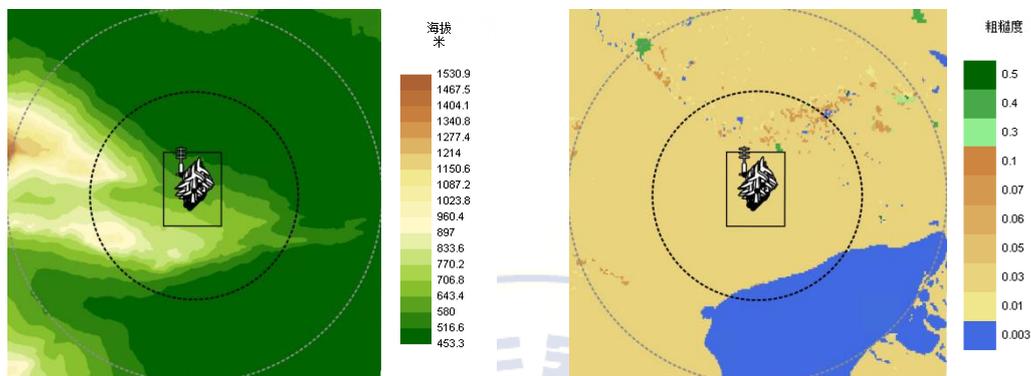


图 7 风电场建模

CFD 模拟分 16 个扇区进行，网格分辨率设置为水平方向 25 m、垂直方向 4 m。

B.5.2 原始流场仿真

采用前期测风塔折算至运行年的风速时间序列数据加入 WT 进行仿真，将尾流后风速与风速还原后的风速进行对比。仿真的平均风速与修正后的机舱风速平均值的偏差为 0.61m/s。



图 8 原始流场仿真结果与运行情况对比

B.5.3 虚拟气象数据仿真

由于上图仿真结果与实际风速结果呈现整体偏差，因此在场区内选择代表性较好的机组位置进行虚拟气象数据的位置挑选。本案例选择 B13 (24#) 机组位置。在 24# 机组位置处的虚拟气象数据运行年风速为 5.5m/s，同期测风塔位置处的虚拟气象数据风速为 5.55m/s，差异较小。若采用此方法进行订正计算，效果甚微。因此本案例不考虑此方案。

B.5.4 加入机组数据进行仿真

选择不受尾流影响时间超 50%的 B13（24#）机组进行分析计算，仿真的尾流后平均风速与修正后的机舱风速平均值的偏差仅为 0.04m/s。

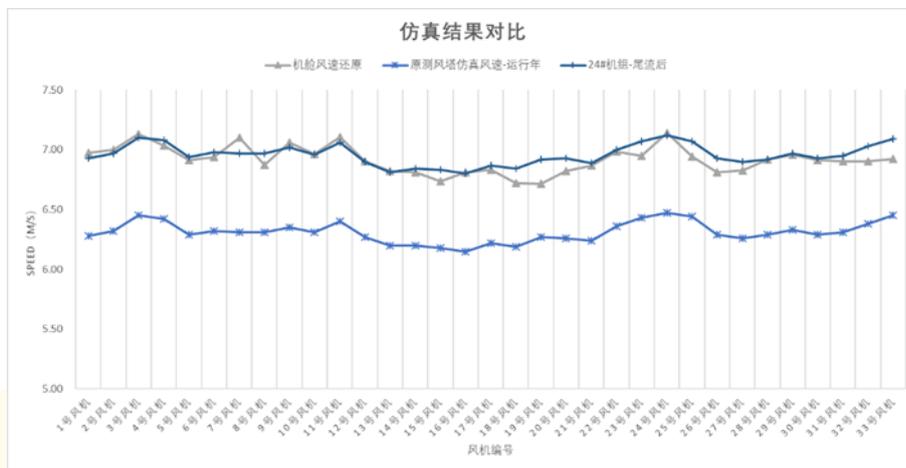


图 9 机组数据仿真结果对比

B.5.5 中尺度模拟与中微尺度结合建模

以风电场所在位置为中心进行中尺度模拟计算，中尺度模拟的水平网格分辨率为 3 km，模拟时间覆盖步骤 B.3 和 B.4 分析的机组运行数据对应的时间段，时间步长为 1 小时。

中尺度模拟完成后，提取 200 m 高度的多中尺度单元数据。中尺度单元的水平尺度为 3 km。多中尺度单元覆盖微观流场建模设置的绘图区域，如下：

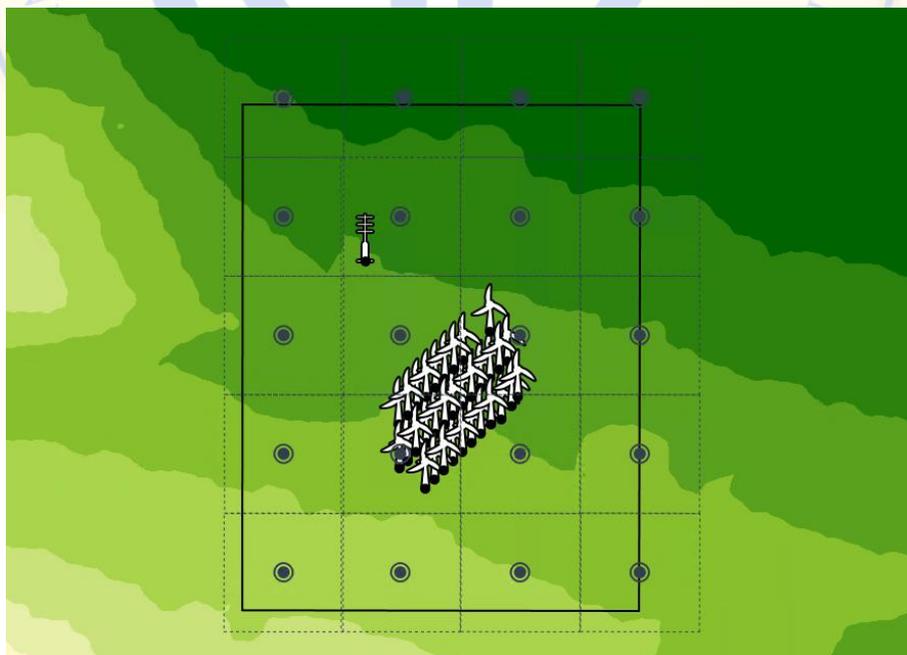


图 10 多中尺度单元绘图区域

将多中尺度单元数据输入微尺度流场模型，进行降尺度计算。特定位置的风流参数的计

算考虑与该点位距离最近的 5 个中尺度单元数据。结合尾流效应模型，得到机位点轮毂高度处考虑尾流效应的平均风速，与步骤 B.4 得到的修正后机组平均风速进行比较。

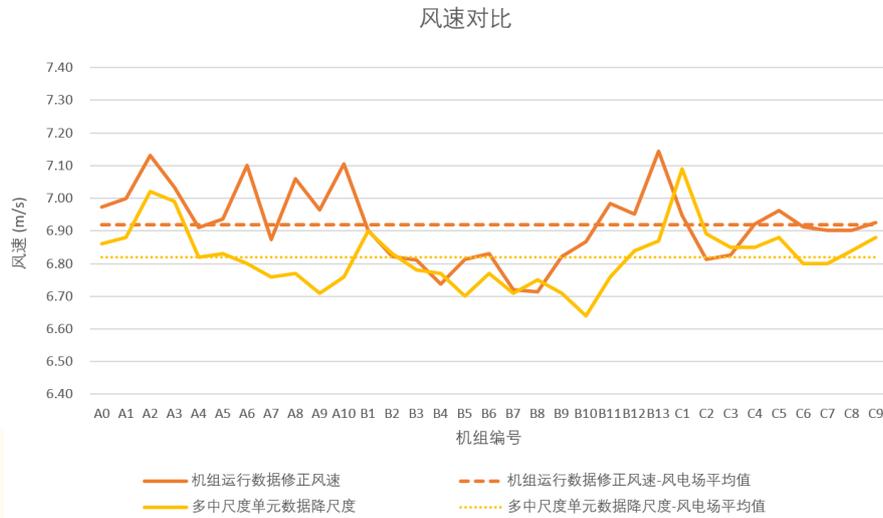


图 11 多中尺度仿真结果

基于上述比较，风电场整场平均的风速模拟结果与机组实际数据修正风速接近（差异约为 0.1 m/s），而模拟风速值的空间分布特征与实际情况吻合度尚可（均方根误差为 0.15 m/s）。考虑对中尺度数据进行修正以降低均方根误差。

B.5.6 风流场建模的改进及验证

基于不同机组位置模拟与实际风速差异，同时结合风电场及周边地形环境特点，针对中尺度数据的订正的将考虑与中尺度单元空间位置的关联性，改善中尺度模拟在研究区域内不同位置的准确性。

将订正后的多中尺度单元数据输入微尺度流场模型，进行降尺度计算，机组位置风速模拟结果如下图蓝色曲线所示。订正后，风电场整场平均的风速模拟结果与机组实际数据修正风速几乎一致，而均方根误差降低至 0.07 m/s。订正后的风资源建模更为准确地反映了风资源空间分布特征。

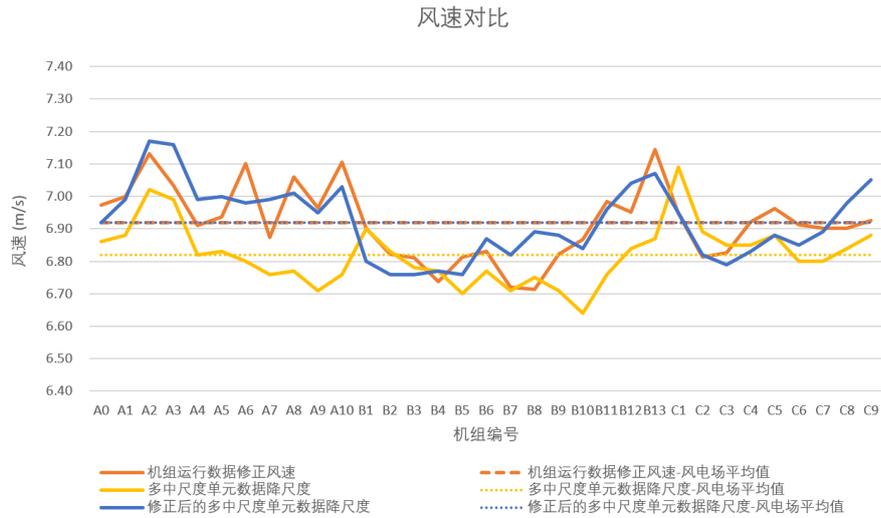


图 12 修正后的多中尺度单元数据仿真对比

分别采用原始多中尺度单元数据（左）与修正后的多中尺度单元数据（右），输入微尺度模型进行降尺度计算，得到的机组轮毂高度平均风速图谱如下。

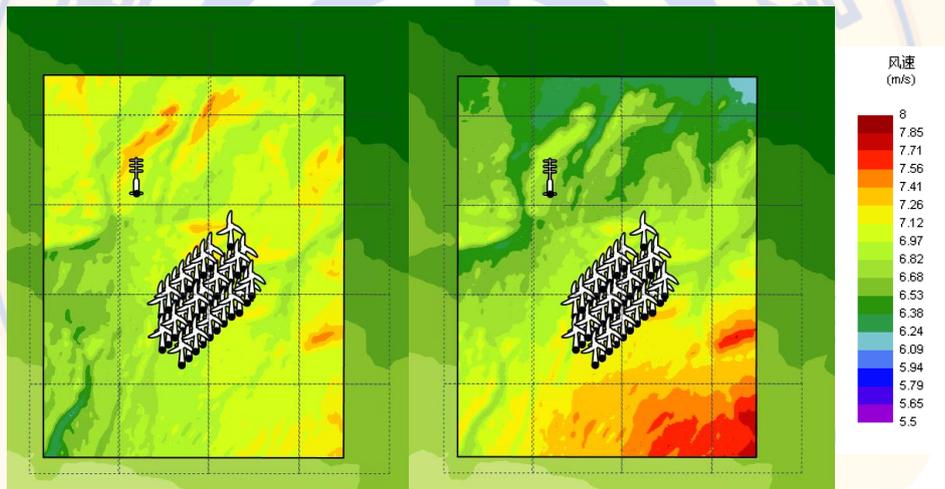


图 13 图谱修正对比

B.5.7 最终风图谱选择

对比 B.5.3 和 B.5.6 的仿真结果如下图，在进行具体风图谱选择时可根据关注的重点区域的仿真结果或整体仿真偏差进行选择。



图 14 多种方式仿真结果对比

B.6 湍流订正

由于上述案例采集到的数据无湍流值，因此采用其他案例并用激光雷达做对比。

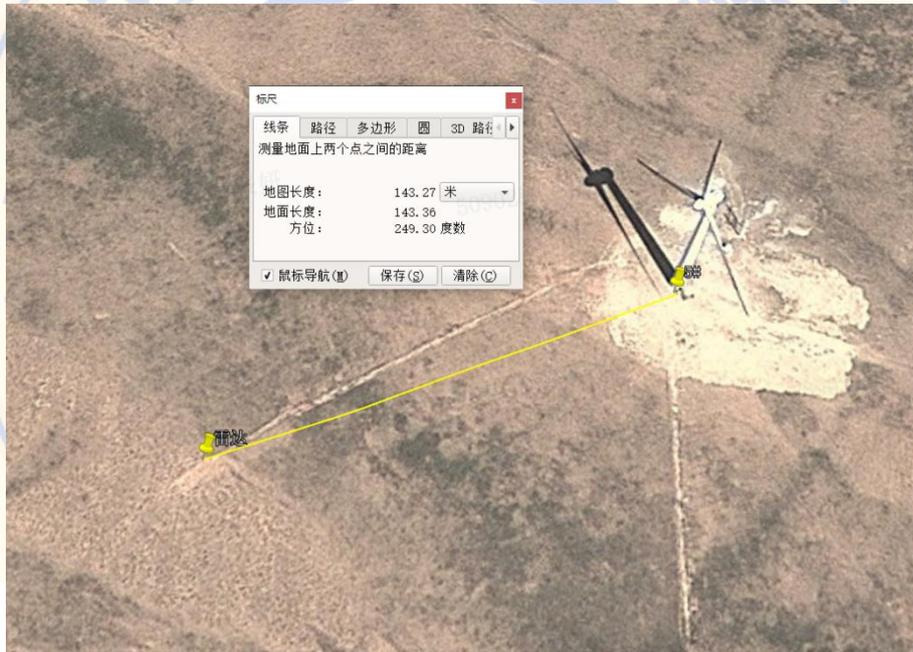


图 15 风电场情况

案例详情：距 5#风电机组 250° 方向 143m 的位置处，设立一座激光雷达，测风时长为 20211026-20220218，数据完整率较差，仅为 31%。与机组同期且雷达在机组上风向的数据点共有 322 个。对上述 322 个数据点进行本方法中所述的风速及湍流的还原。具体为：

- (1) 对全场进行风速还原，得到 5#机组的一次修正和二次修正的系数。
- (2) 对 5#风电机组 20211026-20220218 时间段内的风速进行还原，得到：

表 6 风速还原结果

	雷达风速	机舱风速	一次修正后风速	二次修正后风速
风速 (m/s)	11.2	10.1	10.45	10.65

(3) 在有效扇区内，针对 5#风电机组，筛选正常并网状态下的二次修正后的机舱风速，并与原始机舱风速进行线性拟合，得到拟合的斜率和截距：

表 7 修正系数

normal_a	normal_b	unnormal_a	unnormal_b
0.78	1.61	1.01	0.34

(4) 利用 5.3 中湍流还原的方法，得到还原的湍流：

表 8 湍流还原结果

分段 1	num	tur_radar	tur_nacelle	tur_inflow
(2.5, 3.5]	1	0.207	0.134	
(3.5, 4.5]	7	0.115	0.158	0.047
(4.5, 5.5]	4	0.130	0.200	0.081
(5.5, 6.5]	12	0.105	0.125	0.073
(6.5, 7.5]	32	0.073	0.067	0.074
(7.5, 8.5]	41	0.073	0.071	0.089
(8.5, 9.5]	15	0.072	0.101	0.081
(9.5, 10.5]	25	0.069	0.098	0.085
(10.5, 11.5]	20	0.070	0.091	0.085
(11.5, 12.5]	20	0.058	0.102	0.084
(12.5, 13.5]	32	0.054	0.098	0.097
(13.5, 14.5]	56	0.046	0.066	0.079
(14.5, 15.5]	36	0.043	0.032	0.042
(15.5, 16.5]	11	0.044	0.058	0.027
(16.5, 17.5]	8	0.037	0.138	0.089
(18.5, 19.5]	2	0.052		

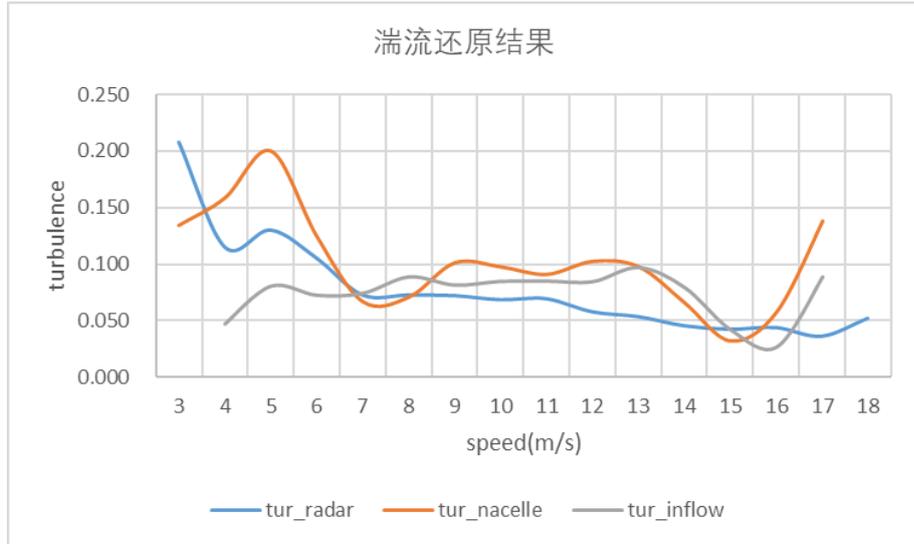


图 16 湍流还原结果图

由于在低风速段的数据点较少，因此只关注 6.5m/s~15.5m/s 风速区间的湍流还原情况，可知湍流还原效果较好。