风能发电系统 功率特性测试场地标定

1 范围

本文件规定了由地形影响得出风速修正的测量和分析程序。

本文件适用于IEC 61400 12-1部分中所述的所有类型和尺寸的并网风电机组的性能测试。该程序适用于特定地点的特定风电机组的性能评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件； 不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

IEC 61400-12-1 风力发电机组 功率特性测试（Power performance measurements of electricity producing wind turbines）

注： GB/T 18451.2—2021 风力发电机组 功率特性测试（IEC 61400-12-1:2017，IDT）

IEC 61400-12-5 风能发电系统 第12-5部分：障碍物与地形评估（Wind energy generation systems - Part 12-5: Power performance - Assessment of obstacles and terrain）

IEC 61400-50-1 风能发电系统 第50-1部分：风速测量 气象桅杆、机舱与轮毂安装仪器的应用（Wind energy generation systems - Part 50-1: Wind measurement - Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments）

ISO/IEC GUIDE 98-3 ed1.0(2008-09) 测量的不确定度第3部分： 测量中不确定度的表示指南（Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement）(GUM:1995)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

准确度 accuracy

被测量（物）的测量值与真实值的接近程度。

3.2

大气稳定度 atmospheric stability

对风是否促进或抑制垂直混合趋势的度量。

注： 稳定大气的特点是相对于不稳定大气，随海拔变化的温度梯度高，风切变高，可能存在风转向和较低的湍流

强度。中性和不稳定大气通常导致较低的温度梯度和风切变。

3.3

复杂地形 complex terrain

试验场地周围地形显著变化的地带或有可能引起气流畸变的障碍物地带（参考3.18）。

3.4

数据组 data set

在连续时段内采集的数据集。

3.5

距离常数 distance constant

风速计的时间响应指标。定义为风速计显示值达到输入风速实际值的63%时，通过风速计的气流行程长度。

3.6

气流畸变 flow distortion

由障碍物、地形变化或其它风力发电机组引起的气流改变，其结果是造成测量位置和风力发电机组位置上的风速差异。

3.7

轮毂高度 hub height

从地面到风力发电机组风轮扫掠面中心的高度。

注： 垂直轴风力发电机组的轮毂高度定义为转子扫掠面质心到地面的高度。

3.8

测量功率曲线 measured power curve

按确定的程序测试、修正和规格化处理后， 用图形和表格表示的风力发电机组净功率输出与风速的函数关系。

3.9

测量扇区 measurement sector

获取功率曲线所需数据的风向扇区。

3.10

区间法 method of bins

将测试数据按照间隔区间分组的数据处理方法。

注：对于各区间数据，记录采集数与它们的和，并计算各区间参数的平均值。

3.11

功率特性 power performance

风力发电机组发电能力的度量。

3.12

风轮等效风速 rotor equivalent wind speed

考虑风速随高度变化，与风轮扫掠面的动能通量相应的风速， 如式（5）所示。

3.13

标准不确定度 standard uncertainty

用标准偏差表示的测量结果不确定度。

3.14

测试场地 test site

被测风力发电机组所在地点及环境。

3.15

测量不确定度 uncertainty in measurement

关系到测试结果的， 表征由测量造成可得量值合理离散的参数。

3.16

测风设备 wind measurement equipment

测风塔或遥感设备。

3.17

风切变 wind shear

风力发电机组风轮高度范围内的风速变化。

3.18

风切变指数 wind shear exponent

风速随高度变化的幂指数a

注： 此参数作为附录C场地标定时风切变大小的量度，也可能有其他用途。幂方程为式（1）：

$$v_{zi} = v_h \left(\frac{z_i}{H} \right)^{\alpha} \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：

v_h ——轮毂高度风速（m/s）；

H ——轮毂高度（m）；

v_{zi} ——高度z_i处的风速（m/s）；

“ ——风切变指数。

3.19

风转向 wind veer

风力发电机组风轮高度范围内的风向变。

4 符号和单位

BinSize 风向区间大小

$d_{j,k}$	在 k 分区的第j 个 10min 周期内的残差	[W]
$\underline{d_{std,k}}$	k分区中场地标定残差的标准偏差	[W]
d_k	k 分区中残差的平均值	[W]
F(WD,α)	9.2 中确定的场地标定气流校正系数	
f	场地标定的自由度	

H	风力发电机组轮毂高度	[m]
k	K 折交叉验证	
L	风电机组与测风设备之间的距离	[m]
N_k	K 分区中的数据组数量	
R	风轮半径	[m]
$Residual$	场地标定残差	[m/s]
RSD	遥感设备	
r	相关系数	
S_{sc}	A 类场地标定不确定度	[m/s]
$S_{sc,i}$	区间 i 内的 A 类场地标定不确定度	[m/s]
$S_{sc,k}$	A 类场地标定标准不确定度	[m/s]
$sccp_{j,j-1}$	利用风向区间j- 1 的场地标定校正系数计算的风向区间j 的场地标定自洽性参数	[。]
$sccp_{j,j+1}$	利用风向区间j+1 的场地标定校正系数计算的风向区间j 的场地标定自洽性参数	[。]
s_{VT}	场地标定的 A 类标准不确定度	
$u_{dVT,i}$	数据采集的 B 类标准不确定度	[m/s]
$u_{dVT,i,j}$	与风速信号数据采集有关的不确定度	
$u_{VT,class,i}$	风速计工作特性的 B 类标准不确定度	[m/s]
$u_{VT,class,i,j}$	与传感器有关的不确定度	
$u_{VT,coc,i,j}$	风向区间j 内校正系数变化导致的标准不确定度	[。]
$u_{VT,i,j}$	现场校准的不确定度	
$u_{VT,lgt,i}$	与避雷针有关的不确定度	[m/s]
$u_{VT,mnt,i}$	风速计安装效果的 B 类标准不确定度	[m/s]
$u_{VT,mnt,i,j}$	与传感器安装有关的不确定度	

$u_{VT,precal,i}$	用于风速计校正的 B 类标准不确定度	[m/s]
$u_{VT,precal,i,j}$	与风速计校正有关的不确定度	
$u_{VT,postcal,i,j}$	与风速计的后校正或现场校正有关的不确定度	
$u_{VT,rmv,i,j}$	拆除风向传感器的 B 类标准不确定度，用于现场校准和功率特性测试之间	[°]
$u_{VT,sv,i}$	与季节变化相关的不确定度	
$u_{VT,sv,i,j}$	与现场校准和功率特性测试之间的季节性变化有关的不确定度	
$u_{w,i}$	风向传感器 B 类标准不确定度	[°]

V_{PM}	参考测风塔风速	[m/s]
$V_{Turb_measured}$	用于预测风力发电机组处风速的参考测风塔风速	[m/s]
$V_{Turb_predicted}$	利用场地标定气流校正系数预测的风力发电机组处风速	[m/s]
v_h	轮毂高度风速	[m/s]
v_{zi}	z_i 高度处的风速	[m/s]
WD	风向区间	[°]
WME	风测量设备	
α	风切变指数	

5 概述

一般而言， 如果风电机组未安装， 风力发电机组上风向的测量的风速可以假定与风电机组所在位置的风速相同。当存在地形影响时，这种假设就不成立了。此外， 大气条件也可能对风速产生影响。根据IEC 61400 12-1进行的功率特性测试， 风速是在距离被测机组2到4个风轮直径的参考位置测量的，而实际需要的风速是风电机组位置在机组不存在的情况下所经历的风速。在复杂地形下，由于受到地形的影响，参考位置和机组位置的风速可能会有所不同。因此，场地标定可以量化并可能降低地形对功率特性测试的影响。地形可能会导致测风塔上用于功率特性测试的风速与风力发电机组所在位置轮毂高度（与风速计距地面高度相等）处的风速存在系统偏差。此外，参考测风塔位置处风速与风力发电机组位置处风速之间的相关性也可能会受到大气稳定度变化和/或风廓线的影响，风切变（风速在距地面垂直高度上的变化）也可能是影响此相关性的一个参数，因为不同的风切变可能会导致测量点之间的相关性不同，特别是当风力发电机组和测风塔处于不同海拔高度时。

季节性因素：大气稳定度、湍流强度和风切变在不同的季节会有所不同，因季节不同测试场地内植被的变化和地表特征（地表水结冰、积雪、农作物等）的变化都会直接造成地表粗糙度的变化，这些都会对测试结果产生影响。考虑到这些因素， 场地标定和功率特性测试应在相同季节进行。如果测试是在不同季节进行，应按照11.5中所述方法增加额外的不确定度。

场地标定应该得到以下结果：

a) IEC 61400-12-1 中定义的测量扇区内所有风向的气流校正表；

b) 气流校正的标准不确定度评估。

场地标定评估有两种不同方法。按照9.1中所述，评估风切变数据，选择一种评估方法。每种方法

输出的结果如下：

c) 9.2 考虑风切变的场地标定：气流校正包括风向和风切变区间矩阵， 该矩阵中每一个数据点都会计算出一个风速校正系数；

d) 9.3 风切变不显著的场地标定：在每个风向区间气流校正包含斜率和截距，并注明回归判定系数 r^2。

本程序中的风速指轮毂高度处风速。本程序不要求测风塔高度达到上叶尖高度，上叶尖高度测风塔昂贵且不实际，遥感设备不适用于复杂地形。然而，如果功率曲线由等效风轮风速导出， 则需对每个测量高度重复该程序， 而不仅仅对测风塔上轮毂高度的风速进行本程序。

功率特性测试的关键因素之一是风速测量。本标准规定使用杯式风速计、声波风速计或遥感设备结合风速计的方式来测量风速。即使采用恰当的程序进行了校准、验证和分级，这些设备固有的原理仍会导致它们的测量结果存在潜在差异。这些设备具有鲁棒性并且被认为适用于功率特性测试，部分设备限制在特定的地形类别才能使用。

6 场地标定程序

在安装风力发电机组之前（或拆除已存在的风力发电机组之后），应竖立两个测风塔。其中一个测风塔为参考位置处测风塔，用于功率特性测试。另一个测风塔竖立在风力发电机组位置处。

本程序是为了确定两个位置之间风速的相关性。7.1中提供了选择这两个位置的进一步建议。

图1为场地标定前期准备和标定分析过程的流程图。

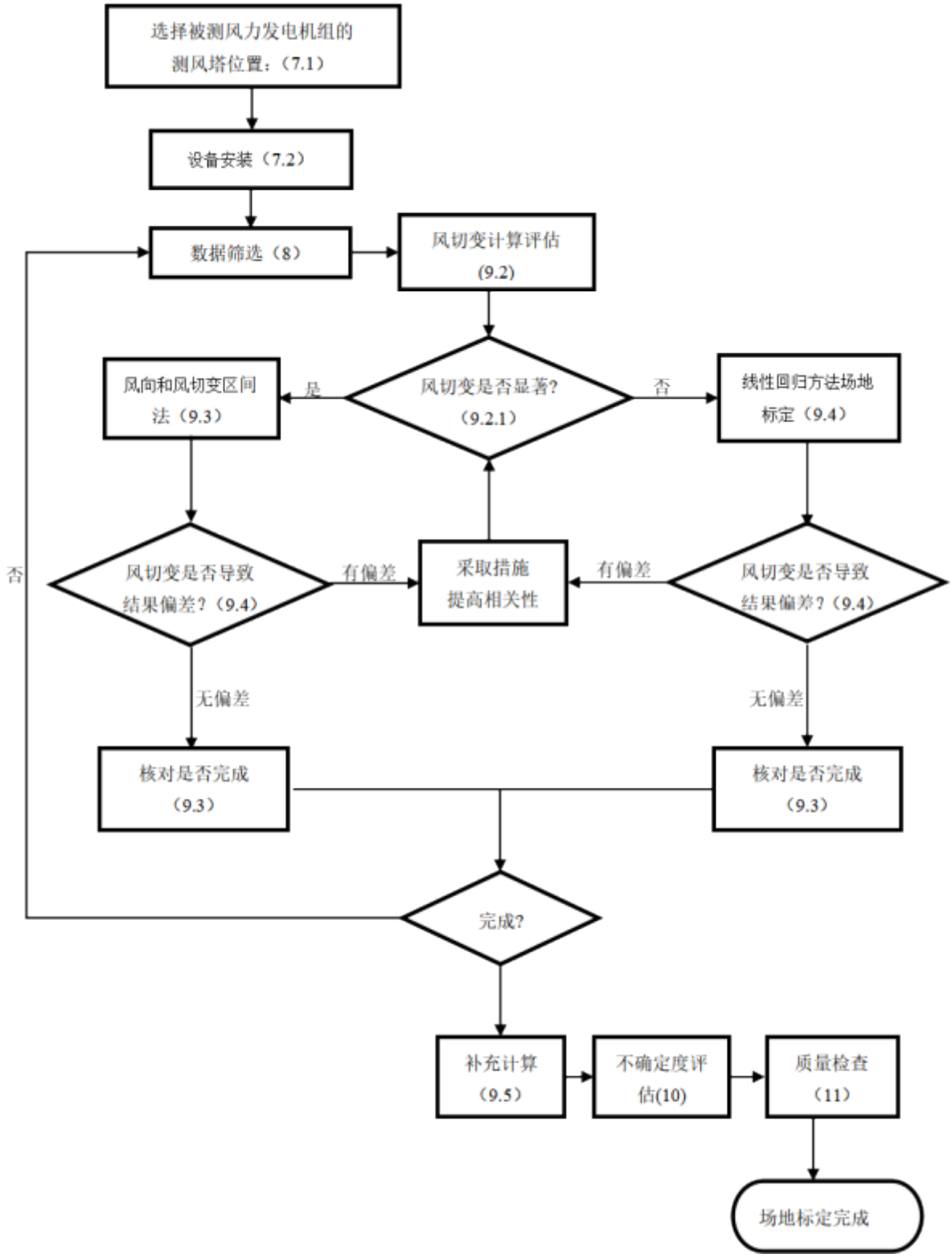

选择被测风力发电机组的
测风塔位置：（7.1）
设备安装（7.2）
数据筛选（8）
风切变计算评估
(9.2)
风切变是否显著?
（9.2.1）
是
否
风向和风切变区间
法（9.3）
线性回归方法场地
标定（9.4）
风切变是否导致
结果偏差?（9.4）
有偏差
采取措施
提高相关性
有偏差
风切变是否导致
结果偏差?（9.4）
否
无偏差
无偏差
核对是否完成
（9.3）
核对是否完成
（9.3）
完成?
补充计算
（9.5）
不确定度评
估(10)
质量检查
（11）
场地标定完成

图1　场地标定流程图

7 测试准备

7.1 选取被测风力发电机组及测风塔位置

参考测风塔应与功率曲线测试所用的测风塔相同。风力发电机组位置处测风塔应尽可能靠近被测风力发电机组将在或曾经所在的位置，且距离被测风力发电机组中心线不得超过0.2H，其中H是风力发电机组轮毂高度。推荐风力发电机组位置处测风塔和参考测风塔应为同一类型，具有相同几何结构的桅杆，以便测风设备具有相似的安装影响。

影响场地标定的因素有很多。其中最值得注意的是地形、测风塔位置和大气条件，大气条件包括风切变、湍流和稳定度。这些因素在不同的位置可能有很大的差异，但通常是相互关联的。

选取被测风力发电机组位置时，应考虑优化有效数据的收集， 使参考测风塔与风力发电机组位置处测风塔具有良好的相关性。场地标定的目的是测量在风随着地形地貌发生变化时， 测量边界层随地形而发生的变化，一般为附着流动；而障碍物往往产生较多的湍流，这些湍流受到尖锐边缘和垂直表面的影响，可能会引发气流分离。此外， 某些地形特征，如悬崖或陡峭的山丘，也可能引起气流分离，导致较差的相关性。依据指导，在选取被测风力发电机组和参考测风塔位置时，应考虑地形类型。这里讨论的地形类型是信息丰富的定性描述，有助于选择被测风力发电机组和参考测风塔位置，并提供在这些地形类型上进行测试时的预期结果。地形类型的示例如图2所示。

类型A：

A类地形是最不复杂的地形类型。 A类地形的场地通常不会导致风力发电机组轮毂高度相对标高或长距离倾角的显著变化。 A类地形的例子包括：符合附录B要求的地形、平缓起伏的丘陵，也可以是面向平原山脊上的风力发电机组所在位置。

对A类地形的场地进行场地标定时，参考测风塔的风切变条件可能与风力发电机组所在位置的风切变条件不同。此时，场地标定的结果很可能取决于风切变和风向。

类型B：

B类地形为中等复杂地形。B类地形包括山脉、山脊线、大山丘和中度倾角的丘陵地带。海拔相对于风力发电机组轮毂高度有显著变化。B类场地的风切变通常较低，且相对稳定，但有时可能出现负切变。因此，风切变不会像A类场地那样重要。然而，在B类场地，场地标定结果通常取决于风速和风向，特别是当参考测风塔和被测风力发电机组之间的高度相差大于10m的情况下。因此，线性回归校正通常适用于B类场地。

B类地形引起的入流角/垂直风速分量对不确定度有显著影响，这取决于风速计对于上升气流的响应。垂直风速测量可用于评估入流角，然后将其与风速计分级的报告结合使用，以计算I.3中定义的S级风速计的影响参数范围的运行特性。

类型C：

从测试角度来看， C类型地形包括最极端的地形。 C类型场地通常具有陡峭的地形特征，如山地或峡谷，可能会直接导致被测风力发电机组的迎风气流分离， 并在被测风力发电机组位置形成一个回流区。气流分离的尺度由地形特征确定，即使地形特征距离被测风力发电机组的距离大于16L，也可能

干扰被测风力发电机组和参考测风塔之间的风速相关性。C类型地形通常复杂，因此参考测风塔处的风速与被测风力发电机组之间的相关性可能较差。相邻风向区间的气流校正可能有很大差异。因为数据通常具有很高的离散性和结果的不确定性，所以在C类型地形位置选择被测风力发电机组时应注意。

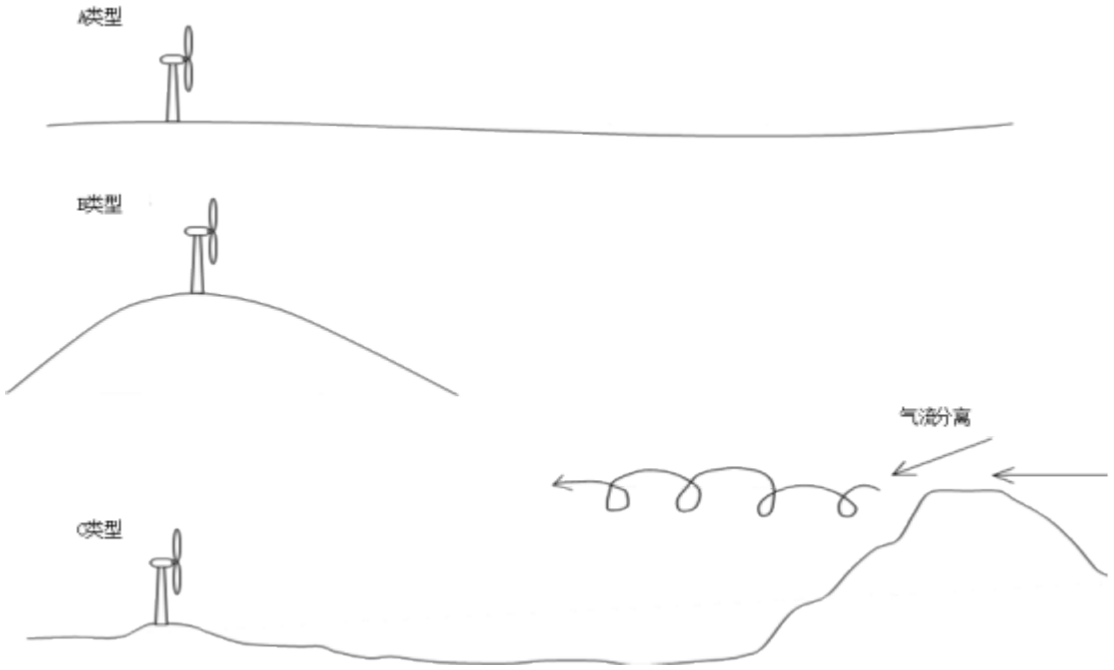


图2　地形类型

为了提高相关性， 参考测风塔应选取与被测风力发电机组海拔和风况相近的位置。例如，如果被测风力发电机组位于山脊上，则推荐将参考测风塔安装在风力发电机组邻近的山脊上，而不是位于风力发电机组前方低海拔处。

7.2　测试设备

测试装置应至少测量两个测风塔处的轮毂高度风速、轮毂高度附近风向以及风切变。

场地标定中使用的测风设备应符合并遵循IEC 61400-50-1的仪器要求和安装指南。风速计应为同一类型，具有相同运行特性且在同一风洞内进行校准。功率曲线测试用的风速计与场地标定用的风速计应为同一类型， 且具有相同的运行特性。

根据场地特点，推荐进行额外的测试（但非规范性要求），以便提供更多有关场地的信息。这些测试通过识别与异常值有关的异常大气条件来提高场地标定及功率曲线测试的整体质量。该测试也可用于确定仪器的分级， 并与相关的分级报告结合使用以量化特定场地风速计运行特性方面的标准不确

定度：

a) 对于较小的风力发电机组，推荐在距轮毂高度 10%或 5m 以内进行垂直风速测量（如使用三维超声波风速计）， 以免违反安装指南中关于顶部传感器的安装要求。这种测试结果可用于确定仪器的正确等级，并可与仪器分级报告结合使用，量化运行特性不确定度；

b) 推荐在下叶尖高度风速测量位置 10m 内测量较低位置的风向， 以测量风转向；

c) 如果场地标定过程中出现结冰情况， 推荐在轮毂高度附近安装温度传感器或其他的用于结冰检测的装置。

此外，为了避免由风向传感器安装不确定度引起的风向测量偏差，在场地标定和功率曲线测试过程中不能拆除参考测风塔及其风向传感器。如果主风向传感器被拆除或更换， 应增加额外的的不确定度分量（见11.4）。 如果在场地标定和功率曲线测试过程中测风塔被拆除或重新安装，则应在两个时间段内以相同的配置和相同的桅杆角度安装设备， 以便达到相似的安装效果。

8 数据采集与筛选准则

应按照与功率特性测试相同的采样率连续收集数据。数据应连续采集，以10min为一个周期。应导出每个10min周期的平均值、标准偏差、最小值及最大值，并存储。

风向区间大小应为10°。

下列情况下的数据组应从数据库中剔除：

a) 测试设备故障或降级（如，结冰引起）；

b) 风向在 6.3.3 规定的测量扇区之外；

c) 风力发电机组位置处测风塔平均风速低于 4m/s 或高于 16m/s；

d) 任何影响场地标定结果并选择作为筛选准则的其他特殊大气条件；

e) 在功率特性测试期间被作为筛选准则且会影响场地标定结果的特殊大气条件。

在场地标定过程中被剔除的任何特殊大气条件，也应在功率曲线测试过程中被剔除。

9 分析

9.1 概述

场地标定测量了空间中两个特定位置风速的关系。地形对这种关系产生了静态的影响（地形不会随着时间推移而改变），但是风切变为这种关系添加了一个动态因素，这是因为风梯度会随着高度的

变化而发生显著的变化。如果场地在一定范围内的风切变非常稳定，则可能不会出现这种情况。

因此，场地标定第一步是评估场地的风切变状况。要进行这种评估首先应进行9.2中的计算与绘图，然后根据结果选择9.3或9.4完成气流校正的计算。根据9.3或9.4计算后，则继续进行9.5中的其它计算。这些计算结果是进行第10章中不确定度计算及第11章中质量检查的前提条件。

9.2 场地风切变状况评估

9.2.1 风切变计算及特征图

对于每个10min的数据点，应进行下列计算：

a) 风速比，即风力发电机组位置处与参考测风塔位置处轮毂高度风速的比值；

b) 应用幂次定律分别计算两个测风塔位置处的风切变指数（见 3.31）；

c) 24h 制的时间应根据时间戳和场地当地时间的时差进行确定。因夏季相对于冬季有更多的日照时间而对当地时间进行的任何调整（如夏令时）， 如果将该调整应用到数据采集器的时间戳，则应记录。

这种分析方法应取决于风切变是否为场地的一个重要因素。高风切变，或者更确切地说是大范围的风切变值，通常是由于夜间稳定大气和白天不稳定大气的昼夜循环所致。为了说明场地的风切变条件，有助于评估风切变，应基于经筛选后的数据绘制风力发电机组位置处及参考测风塔位置处数据的散点图：

a) 风切变指数日变化的散点图；

b) 风切变指数与风向关系的散点图；

c) 风切变指数与风速关系的散点图；

d) 风速日变化的散点图。

应谨慎划分白昼时间。主要原因是因为当地日出和日落时间的相关性往往会对大气的稳定度产生强烈影响。特别是对于较多的数据组和较高纬度地区， 日出、日落和当日时间之间的相关性变得较差。

对于会出现这些影响的场地，通常在白天观测到的风切变指数会很低，因为日照会引起湍流和边界层的混叠，在夜间， 风切变指数较高。因此， 这些场地的风切变指数范围可能很广，而且白天与夜间风切变指数会发生明显的变化。

9.2.2 风切变评估的重要性

无论大气稳定性如何，如果超过25%的数据点的风切变指数大于0.25，则应将风切变视为一个重要因素。

如果根据9.2描述的方法1（风向和风切变区间法）能够改善风速相关性，则应将风切变视为一个重要的参数。否则， 场地标定可以按照9.3中描述的方法2（线性回归法）进行评估。

允许将测量扇区进行划分， 对不同的扇区采用不同的方法进行评估。例如，如果测量扇区的一部分地形是类型A，而另外一部分是类型B，则这种划分就很有用。

为了确保场地标定不会受到异常风切变条件的影响， 场地标定方法应考虑风切变条件的影响， 或剔除异常条件。使用9.2或9.3方法所得的场地标定结果可以使用9.4中的方法进行评估，将场地标定校正结果应用于参考测风塔风速，然后将其与风力发电机组位置风速进行比较。将场地标定残差与风切变或其他大气稳定度指标进行比较，将会显示出所选方法是否能准确地校正所有条件下的参考测风塔位置风速， 或者是否需要采取其他措施来提高质量并降低不确定度。具体地说：

a) 在每个扇区内，4m/s~16m/s 的风速范围内，风速的自洽性参数（9.5 中的式（4）） 应在 0.98~1.02 之间；

b) 在每个扇区内， $V_{\text{Turb_predicted}}$ （式（2））与 $V_{\text{Turb_measured}}$ 的线性回归判定系数 R^2 应大于 0.95。

9.2.3 建立各位置间的风切变关系

如果确定风切变很重要，并且需要根据被测风力发电机组位置处的风切变进行数据筛选，则风力发电机组位置的风切变可以根据在参考测风塔处测量的风切变来预测。获得此风切变的最简单方法是绘制风力发电机组位置处风切变和参考测风塔处风切变的关系图， 并作普通最小二乘法线性回归。应使用经筛选的数据库完成。需注意，在功率曲线测试期间使用该方法可以预测风力发电机组位置的风切变。

如果风力发电机组位置处的风切变与参考测风塔位置处的风切变在所有情况下都不相关，则应采取一些措施，使数据在所有情况下具有相关性。例如，如果参考测风塔与被测风力发电机组位置之间的高度存在显著差异且风切变较高，则可能会出现不相关性，高风切变通常与白昼时间相关。尽管允许使用其他方法剔除掉非相关数据，但在这些情况下，要想获得相关结果，推荐根据白昼时间筛选数据，剔除高风切变夜间数据，可以使用风切变指数日变化图来进行时间筛选。减少测量扇区，这样可以仅考虑具有类似气流条件的方向，按季节筛选或中断场地标定， 或采用其他方法获得完全相关的数据组。风切变指数与风向的关系图可用于确定使用哪些扇区。

任何用于场地标定的筛选条件都应当用于功率曲线测试。如果使用白昼时间筛选，则筛选可以按季节进行调整， 以反映夏季白昼较长，冬季白昼较短。只有来自参考测风塔的数据才能用于任何其他的筛选条件，因为在功率曲线测试期间不可能对风力发电机组位置的数据进行筛选。

通常风切变、湍流和风速具有相关性。风切变指数与风向的关系图、风切变指数和风速的关系图以及风速与白昼时间的关系图可以用于评估这些筛选条件使测试数据减少对某些风速下功率曲线数据的潜在影响。例如， 如果应用白昼时间筛选会导致在高风速下损失大部分数据，则此筛选条件不适用。在极端情况下， 采用的解决方案可能是要进行多个场地标定，每个场地标定都适用于特定范围的大气条件。

9.3 方法 1：风向和风切变区间

为了确定场地标定校正系数是否受场地风切变的影响，应将数据分类整理到风向和风切变区间中。风向区间的大小应为10°， 且不得小于风向传感器的不确定度。在测量扇区边缘，应将数据筛选至测量扇区的范围内。例如， 如果测量扇区以43°结束，区域边缘的场地标定将仅从35°~43°进行评估。要求场地标定和功率曲线测试选择的风向区间中心一致（例如，以10°的整数倍为中心的区间或以10°的整数倍开始的区间）。风切变区间的风切变指数增量应为0.05，并以0.05的整数倍为区间中心。

每个风向和风切变区间内的风速比应取平均值。

风向和风切变区间的完整准则如下：

a) 对于每个风向区间来说， 该风向区间内所有风切变区间的数据点总数量应至少为 144 个（24h 数据） 。该总数中可包括不完整的风切变区间。此外，每个风向区间应至少包含 8m/s 以上和 8m/s 以下各 6h 的数据；

b) 完整的风向区间内的每个风切变区间应包含至少 3 个数据点；

c) 在不完整风向扇区的风切变区间如至少包含 6h 数据，可以认为是完整的。

如果矩阵完成后， 发现场地标定系数不随风切变的增加而变化，则可以不考虑风切变区间，仅根据C.5.3以风向区间为基础对数据进行评估。变化水平应根据场地标定的统计不确定度进行评估。

如果风切变区间之间的变化导致场地标定系数的变化高于一个或多个风向区间中场地标定统计不确定度的两倍， 则分析中应同时包含风切变区间和风向区间。

如果风切变区间之间的变化导致场地标定系数的变化低于一个或多个风向区间中场地标定统计不确定度的两倍， 则可以不考虑风切变区间，数据仅按照9.4基于风向进行评估。

在功率曲线测试期间，数据应整理到风向区间中。对于每10min的数据点，应计算参考测风塔处的风切变指数。应用到轮毂高度风速的校正系数为风速比， 该风速比通过对应风向区间的风切变区间插值得到。最后一个完整风切变区间内的风切变指数允许外推；例如，如果最后一个完整的场地标定风切变区间是0.6风切变区间， 则允许外推测量的风切变指数值在0.600和0.625之间（其中0.625是0.6风切变区间的上边缘， 区间宽为0.05，范围为0.575～0.625）。允许使用两个完整的风切变区间对其间一个不完整的风切变区间进行插值。不准许风向区间插值。

9.4 方法 2：非显著风切变的线性回归方法

数据组按风向区间分类。风向区间的尺寸应为10°。要求场地标定和功率曲线测试选择的风向区间中心一致（例如，以10°的整数倍为中心的区间或以10°的整数倍开始的区间）。在测量扇区边缘，应将数据筛选至测量扇区的范围内。例如，如果测量扇区以43°结束，扇区边缘的场地标定将仅从35°到43°进行评估。

对于每个风向区间，应以风力发电机组位置风速为因变量，以参考风速为自变量，进行普通最小二乘线性回归。因此，每个风向区间都有一个斜率和一个截距。

每个风向区间应至少包含24h数据，其中至少6h的风速大于8m/s，至少6h的风速小于8m/s。为了获得良好的相关性（见11.2），区间内应具有较广的风速分布， 因此推荐包含11m/s以上的风速数据。注意，在普通最小二乘回归法中，异常值的权重很高。应核查并记录任何可能对回归有重大影响的异常值。

为了说明参考位置处风速和风力发电机组位置处风速之间的相关性， 应为测量扇区内的每个完整风向区间生成以下图表。

a) 风力发电机组测风塔风速与参考测风塔风速的关系， 包括线性回归及其相关系数（通常称为 R^2 值）；

在单坐标轴上， 绘制以下内容。见B.9中图B.7：

b) 风速比与参考风速的关系；

c) 风速比在 0.5m/s 风速区间平均值；

d) 曲线 y=m+b/x，其中 m 为线性回归的斜率，b 为截距， x 为参考风速， y 为预测风力发电机组位置风速规格化到参考测风塔风速， 即 y 为风速比；

e) 水平线表示风向区间内所有风速比的平均值。

9.5 其他计算

应将场地标定气流校正系数应用于参考测风塔数据， 以计算每个数据点的预测风力发电机组位置风速。应基于经过筛选的数据库进行。

$$V_{\text{Turb_predicted}} = F(WD,\alpha) \times V_{PM} \quad \text{.....(2)}$$

式中：

$V_{\text{Turb_predicted}}$ ——预测风力发电机组位置风速；

$F(WD,\alpha)$ ——9.3中确定的场地标定气流校正系数;

V_{PM} ——为参考测风塔风速；

WD ——为风向区间;

“ ——为风切变指数（如适用）。

对于每10min的数据点，应根据预测的风力发电机组位置风速与测试风力发电机组测风塔风速之间的差，计算出以下场地标定残差。

$$\text{self_consistency_parameter} = \frac{VTur\ \text{b pr edicted}}{VTur\text{b measured}} \quad \text{.....(3)}$$

对于每10min的数据点，应按如下方式计算自洽性参数：将预测风力发电机组位置风速除以实际风力发电机组测风塔风速。

$$\text{self_consistency_parameter} = \frac{VTur\ \text{b pr edicted}}{VTur\text{b measured}} \quad \text{.....(4)}$$

使用残差和自洽性参数来评估结果中的变量偏差。残差的均值和自洽性参数的均值反映了平均偏差，其均值0和1.0代表零偏差。这些参数的标准偏差表示平均偏差附近的变化，用于计算场地标定的不确定度统计值。

除基于变化零偏差假设的统计不确定度计算外，这些参数还用于计算在11所列的某些情况下要增加的额外不确定度，这些情况是基于对假设平均偏差为零的情况下引入的估计平均偏差的评估。这些

参数的平均偏离分别为0和1.0。

10 场地标定不确定度

10.1 场地标定A类不确定度

10.1.1 场地标定模型分析

场地标定给出了一个以测风塔位置风速预测风力发电机组位置风速的模型。为避免因模型与数据过度拟合而导致A类不确定度被低估的风险，应使用*k*折交叉验证计算A类不确定度，*k*=10。注意，在风电行业， *k*有不同的含义，但是此法通常被称为*k*折交叉验证，因此这里*k*这个术语的使用与统计学中的用法是一致的。

最终筛选后的数据集应根据时间戳划分为*k*个大小相等的折叠（分区）。

每个分区（*k*=1到10）：

a) 场地标定校正系数应根据 9 计算， 仅使用其他 9 个分区的数据；

b) 场地标定校正系数应使用在 *k* 分区的参考测风塔风速计算风力发电机组位置的预测风速；

c) 根据 9.4 中定义的残差参数和自洽性参数， 将 *k* 分区的风力发电机组预测风速与风力发电机组实测风速进行对比。

d) k 分区的统计不确定度由 10.1.2 确定。

A类的总不确定度等于每个分区的不确定度平方和除以*k*的平方根。

$$s_{\mathrm{VT}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k} S_{VT,i}^{2}}{k}} \quad \cdots\cdots (5)$$

选择*k*=10，以便剩下的数据组信息足以涵盖正在评估的数据集中的风速范围， 然而也可以选择其他的*k*值， 只要*k*≥2即可。

因为两个位置之间的风速关系的变化可能同与时间相关的气象条件有关，所以分区按时间戳划分而不是随机选择，因此基于时间的分区可能可以更好地捕获场地标定和功率曲线测试期间条件的差异。

10.1.2 每个分区场地标定统计不确定度

对于*k*折交叉验证中的每个分区，在风力发电机组位置处经过场地标定校正后的风速和测风塔测得的风速之间的偏差每10min计算一次， 所有10min偏差的标准偏差计算如下：

$$d_{\mathrm{std},k} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_k} \left(d_{j,k} - \bar{d}_k\right)^2}{N_k - 1}} \quad \cdots\cdots (6)$$

式中：

$d_{j,k}$ ——在*k*分区的第*j*个10min周期内的残差， 见式（3）；

$\bar{d}_k$

N_k

d

——k分区中残差的平均值；

——k分区中的数据组数量；

——k分区中场地标定残差的标准偏差。

计算标准偏差时，仅包含场地标定评估中的数据。

k分区的统计A类标准不确定度为公式（7）：

$$s_{\mathrm{VT},k} = d_{\mathrm{std},k} \cdot \frac{\sqrt{\sqrt{N_k - 1}}}{\sqrt{f \cdot N_k}} \quad \cdots\cdots(7)$$

式中：

f ——场地标定的自由度；

f 场地标定中10min数据的数量减去场地标定算法所有参数的数量。如果场地标定气流校正系数采用风速比区间平均的形式，则每个风向子扇区的场地标定算法参数数量等于风切变区间的数量。f 等于N_k减去风向子扇区的数量（通常是10°扇区的数量）。如果场地标定气流校正系数采用线性回归（斜率和截距）的形式，则每个风向子扇区场地标定算法的参数数量为2。f等于N_k减去两倍的风向区间数。如果场地标定气流校正系数采用风向区间和风切变区间的形式，f等于N_k减去所有风向子扇区中所有风切变区间的数量之和。

10.2 场地标定 B 类不确定度

10.2.1 概述

在评估合成B类标准不确定度时， 应认为下列不确定度分量相互独立。

10.2.2 风速计预校准

该不确定度包括测试前传感器校准相关的不确定度。

该不确定分量的符号是$u_{\mathrm{VT,precal},i}$

该不确定度参照IEC 61400-50- 1中所述。

风速计校准的标准不确定度由校准得到。若在同一风洞内对参考测风塔和风力发电机组测风塔上的风速计进行了校准， 则风速计校准的不确定度之间存在一定关联。同样，功率曲线测试时所用风速计的不确定度也一样。若在同一风洞中进行了校准， 则实际方法仅包括一个校准不确定度。若在不同风洞中进行了校准或采用了不同型号的风速计， 则这些风速计的校准不确定度各不相关而且应予以考虑。一种实用的方法是，如果在同一风洞中进行校准，则包括一个校准不确定度的幅度。在使用不同风洞或不同模型风速计进行校正时， 不确定度是独立的， 应予以考虑。

具体指导如下。如果参考风速计没有在场地标定和功率曲线测试之间互换，则其校准不确定度完全抵消。只有机组桅杆风速计的校准不确定度是相关的。如果在同一风洞内校准的风速计， 场地标定和功率曲线测试之间交换参考风速计，而该风洞所给出的结果高度可重复，则参照风速计的校正工作便可抵消大部分。如果在不同风洞内校准的风速计， 与校准第一个风速计所用的风洞不同， 而参考风速计的场地标定和功率曲线测试相互换， 则这两个风速计校准的不确定度是相关的。

10.2.3 风速计后校准

该不确定度包括场地标定后传感器校准相关的不确定度。

该不确定分量的符号是$u_{\mathrm{VT,postcal},i}$。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/308067046133006073