

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX-××××/IEC 61400-50-3:2022

风能发电系统 机舱式激光雷达在风速测量 中的使用

Wind energy generation systems—Use of nacelle mounted lidars for wind
measurements

(IEC 61400-50-3:2022 , Wind energy generation systems—Part 50-3 : Use of nacelle
mounted lidars for wind measurements, IDT)

(征求意见稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家标准化管理委员会 发布
国家市场监督管理总局

目 次

目次	I
前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和术语缩写	6
5 概述	10
5.1 总则	10
5.2 测量方法概述	10
5.3 文件概述	11
6 激光雷达要求	11
6.1 功能要求	11
6.2 文件要求	12
7 机舱激光雷达中间值的校准和不确定度	13
7.1 校准方法概述	13
7.2 光束轨迹/几何形状验证	13
7.3 倾角仪校准	14
7.4 测量范围的验证	15
7.5 LOS 风速校准	15
7.6 LOS 速度测量的不确定度	21
7.7 校准结果	26
7.8 校准报告要求	27
8 由于环境条件的变化引起的不确定度	28
8.1 总则	28
8.2 由于环境条件的变化引起的中间值不确定度	28
8.3 循证支持 WFR 充分性	29
8.4 报告的要求	30
9 重构风参数的不确定度	31
9.1 水平风速的不确定度	31
9.2 通过风场重构算法传递的不确定度	32
9.3 与风场重构算法相关的不确定性 <i>u_{ope, lidar}</i>	33
9.4 由测量高度的变化而产生的不确定度 <i>u_{ΔV, measHeight}</i>	33
9.5 由雷达测量不一致产生的不确定度	33
9.6 合成不确定度	33

10 特定测量活动的准备	33
10.1 程序概述	33
10.2 测量活动前的检查清单	34
10.3 测量设置	34
10.4 测量扇区	35
11 测量程序	38
11.1 概述	38
11.2 风力发电机组运行	38
11.3 有效测量扇区的一致性检查	39
11.4 数据采集	39
11.5 数据筛选	40
11.6 数据库	40
11.7 风速重构算法的应用	40
11.8 测量高度变化	41
11.9 激光雷达测量监测	41
12 报告格式-专门用于机舱激光雷达的相关图表	41
12.1 概述	41
12.2 具体测量项目场地描述	41
12.3 机舱激光雷达信息	41
12.4 风力发电机组信息	42
12.5 数据库	42
12.6 绘图	42
12.7 不确定度	43
附录A (资料性) 两光束激光雷达风场重构参数不确定度计算示例	44
附录B (资料性) 建议的俯仰角和翻滚角测量方法	48
附录C (资料性) 在机舱上安装激光雷达的建议	50
附录D (资料性) 评估机舱安装激光雷达对机组性能的影响	53
参考文献	58

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件使用翻译法等同采用IEC 61400-50-3:2022，风能发电系统 第50-3部分：机舱式激光雷达在风速测量中的使用。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国风力发电标准化技术委员会（SAC/TC50）归口。

本文件起草单位：金风科技股份有限公司、xxx。

本文件主要起草人：xx、xxx。

风能发电系统 风力发电机组机舱式激光雷达在风速测量中的使用

1 范围

IEC 61400 本部分的目的是描述流程和方法，以确保使用机舱式测风激光雷达进行的风速测量得以一致地并且基于最佳实践地执行和报告。本文件未规定风速测量的目的或用例。然而，由于本文件构成 **IEC 61400** 系列标准的一部分，预计风速测量将用于某种形式的风能测试或资源评估。

本文件的范围仅限于前视机舱式测风激光雷达（即测量体积位于风力发电机组风轮的上游）。

本文件旨在适用于任何类型和品牌的机舱式测风激光雷达。本文件中提供的方法和要求与型号和类型以及测量原理无关，应当允许应用于新型机舱式激光雷达。

本文件旨在描述使用机舱式测风激光雷达的风速测量，其质量足以用于功率特性测试用例（根据 GB/T 18451.2-2021）。本文件的读者应当考虑其他用例可能有其他特定要求。

本文件仅提供 GB/T 18451.2-2021 附录 B 中定义的平坦地形和海上测量指南。由于编写本文件时经验有限，对复杂地形的应用已被排除在范围之外。

对诱导区或阻塞效应的修正不在本文件的范围内。但是，如果用例需要，可以由用户负责应用由于阻塞效应引起的此类修正或不确定性估计。

本文件的目的是为风速测量提供指导。尽管安全健康环境（HSE）要求很重要（例如激光运行），但它们不在本文件范围内。

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标准必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本标准；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。

GB/T 18451.2-2021 风力发电机组 功率特性测试

GB/T 33225-2016 风力发电机组 基于机舱风速计法的功率特性测试

3 术语和定义

GB/T 18451.2-2021 中给出的术语和定义以及以下内容适用于本文件。

3.1

载噪比 carrier-to-noise ratio (CNR)

脉冲激光雷达信号质量的度量，定义为检测带宽中外差电流功率与总噪声功率之比

注 1：默认 CNR 为 CNR 宽带 (CNR_{wb})。我们也可以将 CNR 窄带 (CNR_{nb}) 定义为外差电流功率与多普勒峰值带宽中的噪声功率之比。这不依赖于频谱信号处理。CNR 不同于信噪比 (SNR)。SNR 是多普勒峰值功率与噪声功率标准偏差之比。

注 2： $SNR = CNR_{nb}\sqrt{n}$ ，其中 n 为平均脉冲数。

3.2

连续波激光雷达 continuous wave lidar (CW lidar)

激光雷达发射恒定幅度和频率的激光信号，同时接收反向散射光。

3.3

关联不确定度 correlated uncertainties

一对不确定度分量，其中一个分量的未知误差与另一个分量的误差有所关联。

注：关联系数可在 -1 和 1 之间变化。

[来源：JCGM 100:2008; 5.2]

3.4

数据可用率 data availability

基于预定义数据质量的可接受测量点数与给定测量周期内可获取的最大测量点数的比值。

3.5

最终值 final values

机舱式激光雷达提供的用于风能评估应用使用的值，例如风力发电机组功率性能测试。

注：因此，最终值的精准度是使用机舱式激光雷达进行风能应用的关键考量因素。最终值的例子包括（但不限于）水平方向的风速和风向。

3.6

自由风速 free wind speed

风力发电机组所在位置处如果没有机组情况下将会存在的风速。

3.7

零差检测 homodyne detection

将接收信号与发射信号相同频率的信号混合的测量技术

注：差频处的混频产物包含接收信号中引起的多普勒频移幅度的信息，但不包含该多普勒频移是正还是负。

3.8

外差检测 heterodyne detection

将接收信号与发射信号不同频率的信号混合的测量技术

注：差频处的混频产物包含接收信号中引起的多普勒频移的幅度和符号的信息。

3.9

中间值 intermediate values

中间值是风场重构(WFR)模型或算法的输入，并提供最终值作为输出

注：中间值的示例包括（但不限于）视向(LOS)风速。

3.10

视向 line-of-sight (LOS)

从激光源沿发射的激光束的轴的方向，对应于光束传播路径

3.11

视向速度 line-of-sight speed (LOS speed)

视向方向风速分量的大小

3.12

视向风速湍流强度 LOS speed turbulence intensity

视向风速标准偏差和平均视向风速的比值，由视向风速的测量数据样本量确定，并在一段具体期限内接收

注：见条款6使用雷达测量特征湍流。

3.13

测量 measurement

通过实验获得一个或多个可以合理地归因于被测对象的量值的过程

[来源: JCGM_200_2012; 2.1]

3.14

测量精度 measurement accuracy

被测量量值与其真实量值之间的接近程度

[来源: JCGM_200_2012; 2.13]

3.15

测量偏差 measurement bias

对系统测量误差的估计

[来源: JCGM_200_2012; 2.18]

3.16

测量周期 measurement period

第一次和最后一次测量之间的时间间隔

[来源: ISO 28902-1:2012, 3.10]

3.17

测量不确定度 measurement uncertainty

基于所使用的信息, 表征被测量的测量值离散度的非负参数

[来源: JCGM_200_2012; 2.26]

3.18

机舱式激光雷达 nacelle-mounted lidar (NML)

安装在风力发电机组机舱上的测风激光雷达

示例: 放置在风力发电机组导流罩中的激光雷达在跟随导流罩绕风轮轴旋转的情况下不被视为安装在机舱上。

注: 如果激光雷达固定在机舱参考系 (而不是风轮参考系) 中, 测风激光雷达只能被视为安装在机舱上。

3.19

探针长度 probe length

激光雷达探测体积的径向范围的度量, 可以取两个点之间的距离进行定义, 这两点处激光雷达的径向灵敏度为其峰值的一半: 半峰全宽 (FWHM) 灵敏度

- 对于脉冲相干激光雷达: 探针长度是速度范围加权函数 (VRWF) 的 FWHM 水平之间的距离。
- 对于脉冲非相干激光雷达 (直接检测激光雷达): 探针长度是激光脉冲 FWHM 水平之间的距离。(假设没有范围平均)。
- 对于连续波相干激光雷达: 探针长度是洛伦兹权重函数的 FWHM 水平之间的距离。

注: 速度范围加权函数将收集速度信息的相对效率描述为围绕标称范围的距离的函数。理想的加权函数是 0 处的狄拉克函数 (风速在一个点处测量)。加权函数的积分 (从负到正无穷大) 等于 1。VRWF 是距离选通廓线与脉冲幅度廓线的归一化卷积。

3.20

探针体积 probe volume

沿激光束传播路径定位的体积, 其中的粒子将光散射回激光雷达系统对接收信号的贡献最大

3.21

脉冲激光雷达 pulsed lidar

激光雷达在短时间内（脉冲）以有规律的间隔发射激光信号，并在脉冲之间接收反向散射光

3.22

遥感 remote sensing

在仪器距离测风矢量位置较远的地方进行测风的技术

3.23

翻滚角 roll angle

激光雷达围绕翻滚轴相对于定义为水平的激光雷达设计方向的旋转角度。

注：翻滚轴沿代表激光雷达平均测量的方向穿过激光雷达坐标系的原点。翻滚轴的准确定义应由激光雷达制造商提供文档说明。对于扫描式激光雷达，建议将翻滚轴定义为单位矢量，与描述光束轨迹的单位矢量的平均值方向相同。对于固定波束激光雷达，建议将翻滚轴定义为，与描述激光雷达固定波束的单位矢量的平均值方向相同。

3.24

标量平均值 scalar average

通过将标量数据的总和除以数据集中的条目数得出的标量数值。

3.25

扫描激光雷达 scanning lidar

对单个发射光束的方向进行扫描的激光雷达

注：在本文件中，考虑了两种类型的扫描激光雷达：

- 1) 固定模式扫描激光雷达：光束按照固定的、预定义的轨迹进行扫描（该轨迹通常是平面或圆锥形）。
- 2) 可编程扫描激光雷达：以可编程方式进行光束扫描。

相较之下，固定光束几何形状的激光雷达是激光束在多个不同但固定的方向上传输的激光雷达，这些方向依次或同时寻址的。

3.26

具体的测量活动 specific measurement campaign (SMC)

一种使用案例的实施。

3.27

俯仰角 tilt angle

激光雷达围绕俯仰轴相对于定义为水平的激光雷达设计方向的旋转角度。

注：俯仰轴穿过激光雷达坐标系的原点，垂直于翻滚轴，并且当激光雷达处于定义为水平的设计方向时，俯仰轴为水平。

3.28

湍流强度 turbulence intensity

风速标准偏差与平均风速的比值，由同一组风速测量数据样本确定，并在指定时间段内采集

[来源：IEC 61400-1:2019, 3.58]

3.29

用例 use case

它包括三个要素：

- 数据要求：由应用产生的目标，与仪器功能无关。

- 测量方法：为满足数据要求选择的激光雷达技术。本指南的范围仅限于使用机舱式激光雷达的方法及其在所述作业条件下的准确性评估。
- 运行条件：环境可能影响测量精度。

[来源：LIFTON, A. et al., 2018]

3.30

矢量平均 vector average

通过将矢量和除以数据集中的条目数得到的矢量。

3.31

风向 wind direction

风速水平分量的方向

3.32

风场重构 wind field reconstruction (WFR)

组合中间值的过程，例如采用多个视向关联的视向速度，以重新得到与用例相关的最终值

3.33

测风激光雷达 wind lidar

一种遥感设备，可将能量从激光源发射到大气中，并分析风中携带的粒子反射的信号，以测量风的特性。

注 1：在本文件中，“激光雷达”一词用于测风激光雷达。

注 2：大多数测风激光雷达的工作原理依赖于多普勒效应，其中由随风移动的粒子反向散射的光的频率是多普勒频移的。

3.34

测风设备 wind measurement equipment (WME)

测风塔或遥感设备

[来源：GB/T 18451.2-2021, 3.29]

3.35

风切变 wind shear

水平风速随高度的变化。

注：在本文件中，重点是风速随风力发电机组风轮跨度高度的变化。

3.36

风切变指数 wind shear exponent

水平风速随离地高度变化的幂律模型指数。

注：幂律公式为

$$v_{z_2} = v_{z_1} \times \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

其中：

v_{z_i} 为高度 z_i 水平风速；

α 是风切变指数。

3.37

风速 wind speed

当地风矢量的幅度

注：水平风速是风速在水平面上的投影大小。

3.38

风转向 wind veer

风向随风力发电机组风轮高度的变化

[来源：GB/T 18451.2, 3.32]

3.39

风矢量 wind velocity

指向所考虑点周围无限小体积的运动的空气的矢量，矢量的大小等于该空气“包”的运动速度（即当地风速）。

注：任何点处的风矢量都是经过该点的空气“包”位置矢量的时间导数。

[来源：IEC 61400-1:2019, 3.73, 已修改—“分钟数”已更改为“无穷小”。]

3.40

偏航误差 yaw misalignment

风力发电机组风轮轴水平偏离风向而产生的角度。

[来源：IEC 61400-1:2019, 3.77, 已修改—添加了“而产生的角度”]

4 符号和术语缩写

4.1 缩略语

本文件使用的缩略语如下：

CNR：载噪比（Carrier-to-Noise Ration）

CW：连续波（Continuous Wave）

DLL：动态链接库（Dynamic-Link Library）

EV：环境变量（Environment Variable）

FWHM：半峰全宽（Full-Width Half-Maximum）

HSE：健康安全环境

LOS：视向（Line Of Sight）

NML：机舱式激光雷达（Nacelle-Mounted Lidar）

RSS：残差平方和（Residual Sum of Squares）

SCADA：数据采集与监控系统（Supervisory Control and Data Acquisition）

SMC：特定测量活动（Specific Measurement Campaign）

SNR：信噪比（Signal-Noise Ratio）

VRWF：速度范围加权函数（Velocity Range Weighting Function）

WFR：风场重构（Wind Field Reconstruction）

WME：测风设备（Wind Measurement Equipment）

WTG：风力发电机组（Wind Turbine Generator）

4.2 符号及单位

表1中显示了文件中文本和公式中使用符号。

表1 本文件中使用的符号

变量	说明	单位
C_j	视向风速的不确定度分量，左右两光束之间是相关的(附录A)	m/s
d	地形位置和校准杆之间的水平距离 (7.5.2.2)	m
D	经测试的WTG的风轮直径	m
D_n	相邻风力发电机的风轮直径	m
$Dir_{offsetCorr}$	真北和机舱朝向角之间的修正角度 $Dir_{Yaw,TR}$ (D.2.4)	deg
$Dir_{TrueNorth}$	机舱相对于真北的朝向 (D.2.4)	deg
$Dir_{1,Nac,TR}$	风力发电机报告的第一个传感器的相对风向的 10 分钟平均值 (D.2.4)	deg
$Dir_{2,Nac,TR}$	风力发电机报告的第二个传感器的相对风向的 10 分钟平均值 (D.2.4)	deg
$Dir_{Yaw,TR}$	风力发电机报告的机舱朝向的 10 分钟平均值 (D.2.4)	deg
H	轮毂中心高度	m
h	障碍物被视为显著障碍物时的高度阈值	m
H_0	光束0在附录B中特定的俯仰和翻滚位移后被抬升的高度	m
H_1	光束1在附录B中特定的俯仰和翻滚位移后被抬升的高度	m
H_{OH}	激光雷达光学头与风轮轴之间的垂直距离	m
H_{ref}	用于激光雷达校准的参考风速仪器的离地高度	m
i	如果用作索引：是对风速区间编号的引用	-
k	符合 GB/T 18451.2-2021 附录 E.2.2 的包含因子	-
L_0	针对附录B中光束0的光束原点与测点之间的距离	m
L_1	针对附录B中光束1的光束原点与测点之间的距离	m
L_e	与邻近障碍物之间的距离(10.4.2)	m
l_h	障碍物的高度	m
L_n	与相邻风力发电机的距离(10.4.2)	m
l_w	障碍物的宽度	m
L_{probe}	激光雷达探测长度	m
L_{ref}	激光雷达与参考仪器（校准时）之间的水平距离	m
L_u	叶轮平面与上游测量位置之间的水平距离	m
N	一个区间内的数据量	-
R	激光雷达校准设置中激光雷达和参考仪器之间的总距离 (7.5.4)	m
r	障碍物与校准测风塔之间的距离	m
$r_{i,j}$	不确定度分量之间的相关性(附录A)	-
R_b	沿LOS的测量范围 (10.4.2)	m

变量	说明	单位
R_{conf}	激光雷达测量范围（配置的）(7.5.4)	m
s	地形平均坡度 (7.5.2.2)	%
u_{cal}	用于测量 V_{hor} 的参考风速传感器的校准不确定度	m/s
u_{daq}	数据采集系统不确定度	m/s
u_{HWS}	重构水平风速的不确定度	m/s
U_i	不确定度分量的变量(A.2)	
u_{inc}	由于光束倾斜和测量范围而引起的不确定度	m/s
$U_{L,i}$	左侧LOS的不确定度分量，它们是不相关的，具体见(A.2)	m/s
u_{igt}	与安装引闪器相关的不确定度，如果有	m/s
u_{mast}	由于安装用于测量 V_{hor} 的参考传感器而引起的不确定度	m/s
u_{ope}	用于测量 V_{hor} 的参考风速传感器的分类不确定度	m/s
$u_{ope,lidar}$	激光雷达的操作不确定度 (9.3)	m/s
u_{pos}	由于光束定位而引起的不确定度	m/s
$U_{R,i}$	右侧LOS的不确定度分量，它们是不相关的，具体见(A.2)	
u_{range}	测量范围不确定度	m
$u_{residual}$	校准公式残差的不确定度(9.2.1)	m/s
u_{sens}	校准设置中参考传感器的不确定度 (7.6.2.2)	m/s
u_{probe}	由于激光雷达探测体积内水平风场变化而引起的不确定度	m/s
u_{vert_pos}	由于参考传感器和视向之间的高度差而引起的不确定度	m/s
$u_{V,hor}$	水平风速不确定度	m/s
$u_{V,LOS}$	视向速度估计的不确定度	m/s
u_{V_m}	测量风速不确定度(A.4)	m/s
u_{rfr}	参考风速不确定度	m/s
$u_{(v),WFR}$	视向速度不确定度通过 WFR 算法传播的不确定度	m/s
$u_{WFR,par}$	由于 WFR 算法中参数而引起的不确定度 (9.2.2)	m/s
$u_{(v),measHeight}$	由于测量高度变化而引起的不确定度 (9.4)	m/s
u_{z_m}	测量高度不确定度(A.4)	m
u_{α}	剪切指数不确定度(A.4)	-
u_{θ}	风向的不确定度	deg

变量	说明	单位
$u_{\theta,LOS}$	LOS估计不确定度	deg
$u_{\theta,r}$	相对风向不确定度	deg
u_{φ}	光束仰角不确定度	deg
\bar{V}	激光雷达测量结合 WFR 算法而得出的水平速度	m/s
V_{2LOS}	使用2 LOS重构方法重构的水平风速 (附录A)	m/s
V_H	外推至需求高度处的水平风速 (附录A)	m/s
V_{hor}	在校准期间由风速参考仪器测量的水平风速 (附录 A)	m/s
V_L	从雷达后方看过去的左侧视向的LOS速度 (A.1)	m/s
V_{LOS}	视向速度	m/s
$V_{LOS,norm}$	归一化的激光雷达视向速度 (用于在校准期间确定 θ_{LOS})	-
V_m	在测量中光束指向高度处的水平风速 (A.4)	m/s
$V_{NAC, TR}$	风力发电机报告的风速的 10 分钟平均值 (D.2.4)	m/s
V_R	从雷达后方看过去的右侧LOS的视向速度 (A.1)	m/s
V_{ref}	校准期间使用的参考速度 (在视向方向)	m/s
V_x	纵向风速分量 (A.1)	m/s
V_y	横向风速分量 (A.1)	m/s
W	垂直风速, 在校准期间由参考仪器测量	m/s
X_{OH}	激光雷达光头与叶轮平面之间的水平距离	m
z	相对于参考平面的地形高度 (7.5.2.2)	m
z_H	需求测量高度 (A.4)	m
z_m	激光雷达获取测量值的高度 (A.4)	m
α	剪切指数	-
β	包含两个光束的平面中两个光束之间的角度 (7.2.1.2)	deg
β_{max}	轨迹/几何形状内任何两个光束位置之间的最大水平角 (10.4.2)	deg
γ	相对于水平面对称的两个光束之间的开口角—具体见附录 B 中的示例	deg
γ_V	γ 在垂直面上的投影—具体见附录 B 中的示例	deg
$\Delta Dir_{i,Nac}$	机舱传感器提供的两个风向测量值之间的角度差, 并且已对风速区间 i 求平均值	deg
ΔV	LOS速度与参考风速的差值	m/s
ΔV_{hor}	由于测量高度变化而引起的风速修正 (附录 A)	deg
δ	激光雷达光学轴与要校准的视向之间的角度 (7.5.4)	deg

变量	说明	单位
δ_v	由于入流角导致的视向风速的相对误差 (7.5.5)	
δ_{cal}	倾角仪校准的修正结果 (C.2)	deg
δ_H	水平面和激光雷达光学轴指向距离轮毂高度2.5D处之间的垂直角度 (C.2)	deg
δ_{Nac}	机舱在WTG正常运行和静止时的方向之间的俯仰角差异 (C.2)	deg
δ_{ope}	WTG正常运行状态时的机舱俯仰角 (C.2)	deg
$\delta_{StandStill}$	WTG静止状态时的机舱俯仰角 (C.2)	deg
δ_{tot}	激光雷达光学头预调俯仰角度	deg
θ	风向, 在激光雷达校准期间由风向参考仪器测量 (第 7 章)	deg
θ_0	θ_{LOS} 方向的大致估算	
θ_{2LOS}	通过 2-LOS WFR 算法得到的水平风向	deg
$\theta_{induction}$	由于考虑到邻近风力发电机组或其他障碍物的诱导区引起的激光雷达探测体积中的流动畸变, 测量中应排除的风向扇区	deg
θ_{LOS}	视向方向	deg
θ_{Proj}	投影角 (第 7 章)	deg
θ_r	相对风向 ($\theta_r = \theta - \theta_{LOS}$)	deg
θ_{wake}	为了覆盖相邻风力发电机或其他障碍物的尾迹, 测量中应排除的风向扇区	deg
ρ	翻滚角	deg
σ_{dev}	视向速度与参考风速之差的标准差 (7.6.4)	
τ	俯仰角	deg
φ	激光雷达校准期间激光雷达光束的仰角 (第 7 章)	deg
ψ	风速矢量与水平面的夹角 (入流角), 见 7.5	deg

5 概述

5.1 总则

本文件适用于使用以下测量原理的激光雷达: 激光雷达的基本被测对象为视向(LOS)风速。需要得到的测量值, 例如水平风速和风向, 是通过视向速度的多个测量值以及一些参数推导得出的 (参数包括激光雷达俯仰和翻滚角度、每个视向方向和激光雷达光轴之间的角度), 这些参数定义了视向方向和测量范围。

用于推导出所需被测对象的算法称为风场重构 (WFR)。WFR 算法的输入被称为中间值 (例如视向速度、激光雷达俯仰和翻滚角度等)。WFR 算法的输出被称为最终值 (例如水平风速)。

5.2 测量方法概述

总体方法包括两个阶段的特定测量活动 (SMC): 准备和执行。SMC 是用例的实现。

第 1 阶段: 校准和对环境变量的灵敏度

本文件第 7 章所述的校准方法采用“白盒校准”方法来校准，并针对中间值提供不确定度。校准工作提供每套设备特有的校准系数和测量不确定度，因此必须对每套激光雷达装置单独执行。

SMC 期间的环境条件与激光雷达设备校准期间的环境条件有所不同。通过分析每个中间值的准确度对这些变化的灵敏度，以此评估对测量不确定度产生的影响。假设这些灵敏度是特定激光雷达类型的特征，并适用于该类型的任何个体。这些灵敏度的处理方法如第 8.2 节中所述。

在编写本文件时，还没有足够的NML经验，因此无法评估不同的环境条件对于 WFR 的影响。因此，在本文件的最新版本中，我们采用务实取向方法，将测量不确定度的这一分量赋以零值，但前提是有证据证明特定类型的激光雷达具有足够的测量精度。此类证据库的要求如第 8.3 节中所述。

中间值的校准和敏感性分析提供了主要的不确定度分量，这些分量必须传递到 SMC 最终值（如水平风速）的不确定度。

应在 SMC 启动前进行机舱激光雷达装置的校准和机舱激光雷达类型的敏感性分析。

请注意，本文件中描述的规程与GB/T 18451.2-2021中描述的地面遥感器方法不同，后者仅描述最终值（例如水平风速）的校准和/或验证。在GB/T 18451.2-2021中，评估由于不同环境条件对风速测量精度的影响而对测量不确定度的贡献被称为“分级”，但本文件的当前版本中未使用该术语，因为没有为激光雷达类型指定“分级”。

第 2 阶段：特定测量活动

相关标准（如，针对功率特性测试的GB/T 18451.2-2021）中提供了 SMC 的要求。使用机舱式激光雷达的典型测量活动将遵循 4 个步骤：

- 1) 准备—包括现场评估、测量扇区和激光雷达在机舱上的安装准备；
- 2) 测量；
- 3) 完整的测量不确定性评估；
- 4) 报告。

5.3 文件概述

本文件的主要章节不相互依赖。因此，可以只引用主要章节的某些部分，而不是所有章节，以使本文件适应特定用例。但主要章节是按逻辑顺序展现的，可以在实践中应用。

第 6 章描述了激光雷达应满足的要求，以便本文件中描述的各种方法适用。

第 7 章描述了 NML 校准的流程和要求。

第 8 章描述了如何评估中间值对环境条件变化的灵敏度。第 8 章还描述了循证的要求，循证能够支持由于环境对 WFR 的影响而对测量不确定度零贡献的假设。

第 9 章描述了中间值的不确定度（根据第 7 章进行校准和根据第 8 章进行敏感性分析后得出）如何通过 WFR 算法传播到最终值（例如水平风速和方向）。附录 A 中提供了一个两光束激光雷达的例子。

第 10 章描述了在 SMC 之前的准备阶段要考虑的 NML 具体方面。

第 11 章描述了测量流程，包括过滤和数据库要求，以及在 SMC 期间监控测量所需的传感器输出和辅助系统要求。

第 12 章提供了专门针对 NML 的报告的最低要求（报告的总体要求由用例提供）。

6 激光雷达要求

6.1 功能要求

为了与本文件兼容，机舱式激光雷达应至少满足以下功能要求：

- 1) 激光雷达应至少提供下列其中一项数据：

- a) 重构的水平风速、相对于激光雷达光学轴的风向以及湍流强度的估计值；
- b) 可以用于重构水平风速、风向和湍流强度估计值的中间值；
- 2) 应提供视向风速以支持校准流程；
- 3) 激光雷达应配备一个或多个倾角仪，以测量 WFR 算法所需要的某些角度，而且倾角仪的采样率需大于或等于水平风速重构速率；
- 4) 应在数据流中提供俯仰角和翻滚角的测量值（以及 WFR 所需的任何其他参数）；
- 5) 激光雷达应能够在叶轮前方的一个或多个已知距离（范围）进行测量。测量距离应满足用例的要求。（例如，对于符合 GB/T 18451.2-2021 的功率特性测试，从风轮平面开始的测量距离应在被测 WTG 叶轮直径的 2 到 4 倍之间）。
- 6) 激光雷达测量数据应具有相对于已知参考的准确时间戳（±2 秒）。此类时间参考可通过卫星定位系统 或风力发电机组主机的时间参考来提供。
- 7) 需要能够将测量设备对准偏航自由度的 1 度标准不确定度范围内。
- 8) 激光雷达应提供数据质量控制代码。
- 9) 上述参数应至少提供 10 分钟的统计数据。

6.2 文件要求

6.2.1 技术文件

为了提供支持激光雷达校准、不确定度的灵敏度和操作所需的技术内容，应记录以下事项：

- 1) 测量视向速度的方法（例如，连续或脉冲相干多普勒激光雷达）；
- 2) 激光雷达探针长度— L_{probe} 如第 3.19 节中定义；
- 3) 光束数量。光束的数量是由系统中可能的光路数量来定义。光路的定义是：光从光源到大气穿过的一系列光学元件；
例如，来自单一激光源的光束被切换或分割到不同路径（例如不同的透镜）的平行设计被认为是多光束装置。来自单个激光源并使用移动棱镜或反射镜定向于不同方向的光束被视为单光束装置；
- 4) 激光雷达是以固定光束几何结构、固定扫描模式还是可编程扫描模式运行；
- 5) 光束几何结构或扫描模式的几何描述，包括相关角度和角度公差；
- 6) 内部坐标系，包括符号约定；
- 7) 扫描速率，是指完成整个扫描模式的执行完成所间隔的时间；
- 8) 对于扫描激光雷达，动态位置不确定度的估算（见 7.2.2）；
- 9) 仪器测量的是单个还是多个距离，如果是多个距离，应记录不同距离的时间顺序（例如，每个 10 分钟间隔测量一个距离，10 分钟间隔内不同距离之间的顺序切换，或在 10 分钟间隔内每次测量期间从多个距离采集数据）；
- 10) 仪器区分不同距离的方法（例如聚焦或距离选通）；
- 11) 根据测得的视向风速来计算水平风速、相对风向和估计湍流强度的方法（WFR 方法）的一般说明；
- 12) 有关如果建立湍流强度估算值与点测量湍流强度（例如，通过杯式风速计测量）关联性的信息；
- 13) 数据流或记录数据中提供水平风速和风向的数据可利用率；

- 14) 质量控制代码的解读方法;
- 15) 仪器中使用的倾角仪及其测量原理的技术说明(例如,采用的是加速计还是陀螺传感器)。应至少包括测量范围、分辨率、准确度和采样率;
- 16) 设备的当前固件版本;
- 17) 设备的已知的环境和运行限制的列表(例如倾斜度、温度等)。

6.2.2 安装和运行文件

为支持在风力发电机上安装和操作激光雷达,文件还应说明以下事项:

- 1) 主要激光雷达部件的尺寸和重量及其安装布局;
- 2) 激光雷达的功率要求和功耗;
- 3) 在风力发电机机舱上安装激光雷达的全过程,包括可能需要对风力发电机进行的永久性改造的清单;
- 4) 将激光雷达光学轴与风轮轴在水平面上的投影对齐的系统 and/或流程;
- 5) 任何所需布线的详细信息;
- 6) 数据连接要求;
- 7) 时钟同步要求;
- 8) 其他资源或消耗品的要求,如镜头清洗液;
- 9) 确保眼睛安全所需的任何流程或表明无需此类流程的证明。

7 机舱激光雷达中间值的校准和不确定度

7.1 校准方法概述

该方法用于校准激光雷达 WFR 算法的输入。共分为五个步骤:前三步校准光束位置量(光束轨迹、倾角和测量范围),后两步校准 LOS 风速 V_{LOS} 并评估其不确定度 $u_{V_{LOS}}$ 。光束位置的校准方法基于激光雷达技术和激光雷达光束轨迹的特定几何形状。对 V_{LOS} 不确定度的校准和评估方法更通用,但详细方法(特别是光束位置量的确定)可能仍然取决于激光雷达技术的特性。

光束位置的确定需要对激光雷达光束的精确定位和检测,按以下方式实现:

- 通过可视激光束,例如利用红外感应卡或红外摄影机等;
- 通过利用实体目标测试:测试包括利用反射面阻挡光束来测量目标的位置。当光束被阻挡时,激光雷达测量到的信号电平与光束不被阻挡时相比高出许多。零差激光雷达必须用运动目标进行测试,因为其无法探测速度。

在开始 SMC 之前,应对机舱激光雷达的每个雷达单元进行校准。被认为有效的校准持续时间和在此期间允许的 SMC 数量应由与相关案例的指导和制造商的建议确定。有例如影响测量的光学组件或固件的任何变化均需要重新校准。

7.2 光束轨迹/几何形状验证

7.2.1 静态位置不确定性

7.2.1.1 方法

定义光束几何形状(固定光束几何激光雷达)或光束轨迹(扫描激光雷达)的角度应按如下方式测量:

- 固定光束几何激光雷达:各 LOS 方向之间的夹角;

- 固定模式和可编程扫描激光雷达:扫描激光雷达的扫描轨迹特征角度值(例如,固定模式锥形扫描激光雷达的锥角;可编程扫描激光雷达的方位角和仰角)。

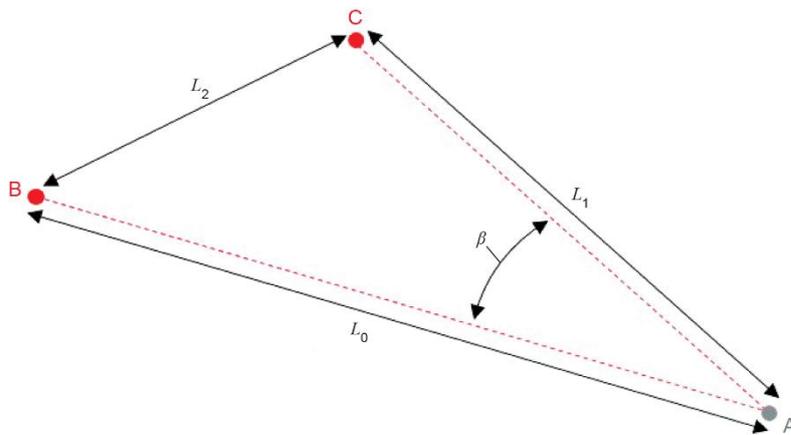
应对测量角度的不确定度进行说明。测试结果(测量角度和它们的不确定度)应与制造商规范(见 6.2.1 所述技术文件)中规定的角度值和公差一致。

7.2.1.2 举例说明

图 1 为两光束(固定光束几何)机舱激光雷达的光束几何验证实例。在这个实例中,光束几何形状的验证包括验证两个 LOS 方向之间的夹角 β (如图 1)。用仪器测量距离 L_0 , L_1 , L_2 (例如用经纬仪)。图 1 中两光束之间的夹角 β 计算公式如下:

$$\beta = \arccos\left(\frac{L_0^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_0L_1}\right) \quad (2)$$

被测角度的不确定度来源于 L_0 , L_1 和 L_2 的测量不确定度。



注:A 点表示光束发射点, L_0 和 L_1 分别是 A 点到被检测光束位置 B 点和 C 点的距离。

图 1 - 两共面光束之间的夹角 β

7.2.2 动态位置不确定度

对于扫描激光雷达,当它在测量时,激光光束处于运动状态(或快速运动后停止),由于运动控制系统不能提供准确的位置,将会附加额外的位置不确定度。这种不确定度称为动态位置不确定度。除了静态测量中测量的夹角及其不确定度外,还应量化或提供扫描轨迹动态位置不确定度。

7.3 倾角仪校准

倾角仪校准的目的是建立激光雷达倾角仪指示俯仰角($\tau_{indicated}$)和翻滚角($\rho_{indicated}$)的与参考测量值($\tau_{measured}$, $\rho_{measured}$)之间的关系。

校准流程包括:

- 1) 读取激光雷达倾角仪指示位置值, $\tau_{indicated}$, $\rho_{indicated}$;
- 2) 测量被检测光束相对于光束发射点位置的距离和高度差(例如使用经纬仪);
- 3) 计算俯仰角和翻滚角($\tau_{measured}$, $\rho_{measured}$), 并与倾角仪指示值进行比较。

应重复执行该流程,从而获得至少 5 个不同 $\tau_{indicated}$ 值和至少 5 个不同 $\rho_{indicated}$ 值的组合。校准范围应尽可能涵盖 SMC 期间可能出现的俯仰角和翻滚角范围。最后应注明校准范围。

应注明测量的俯仰角和翻滚角的不确定度。

附录 B 提出了一种适用于 2 束激光雷达的俯仰角和翻滚角现场测量方法。

7.4 测量范围的验证

按以下任一种方法验证测量距离:

- 从已知位置目标对不同测量距离的后向散射水平进行目视观察。
- 进行 LOS 速度校准数据的统计分析: 根据参考仪器所在位置将激光雷达配置为若干测量距离。分析参考风速与不同距离测量的 LOS 风速之间的相关性。预测最接近参考仪器的距离位置的相关性最高。
- 焦点校准方法(固定或可变焦点零差激光雷达),例如,光束直径可视作 LOS 方向距离的函数,实现光束直径测量;或或通过测量激光雷达焦点调整时、在固定的标定距离处,从运动目标散射的激光雷达回光信号的强度。

建议验证的距离接近 LOS 速度校准使用的测量范围(校准范围建议参见 7.5.4)。

应对每个光束进行测量距离的验证并说明不确定度。

7.5 LOS 风速校准

7.5.1 方法概述

该校准的目的是建立激光雷达测得的 LOS 风速 V_{LOS} 和在该 LOS 方向的参考速度 V_{ref} 之间的关系,参考速度 V_{ref} 由可追溯的校准仪器测得。对于连续波激光雷达,参考风速在激光焦点处测量;对于脉冲激光雷达,参考风速在探测长度的中心位置测量。

为实现该目的,激光雷达安装在符合 7.5.2 描述要求的测试现场,按照 7.5.3 要求进行安装,测量距离按照 7.5.4 的要求进行配置。LOS 速度校准方法见 7.5.5~7.5.7。

V_{ref} 是风速在视向的投影分量,基本计算公式如下:

$$V_{ref} = V_{hor} \cdot \cos \varphi \cdot \cos (\theta - \theta_{los}) + W \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

其中,

V_{hor} 为水平风速,由风速参考仪器测得;

φ 为激光雷达光束与水平面的夹角(见图 4);

θ 为风向,由风向参考仪器测得;

θ_{los} 为 LOS 方向;

W 为垂直风速,由参考仪器测得。

由于在平坦地形中,风速垂直分量通常比水平分量小得多 ($W \ll V_{hor}$),光束仰角和入流角小(如在 $-2^\circ \sim +2^\circ$ 之间),风速垂直分量的影响可以忽略不计,公式(3)可以简化为:

$$V_{ref} = V_{hor} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta_r \quad (4)$$

其中, $\theta_r = \theta - \theta_{los}$ 为相对风向,即风向与 LOS 方向之差。以下 V_{ref} 均为公式(4)表示的参考风速。注:公式(4)中的 V_{ref} 的定义时需要将 V_{hor} 和 θ 的测量值进行矢量平均

每个光束都应进行 LOS 速度校准。

7.5.2 校准场地要求

7.5.2.1 定义

激光雷达应设置为在紧邻参考传感器的安装位置进行测量(见 7.5.3)。激光雷达与参考仪器的水平距离为 L_{ref} 。参考传感器的地形高度为 H_{ref} 。激光雷达探测长度 L_{probe} 的中间位置与测量传感器相邻(注意激光雷达测量探测长度之前和之后的风速,见 3.19)。参考平面是一个通过参考气象塔基座的水平平面。地形高度 $z(r)$ 从该平面测量(其中 r 为光束方向上与气象塔的水平距离)图 2 为校准设置的示意图。

下面给出了两个特定区域的要求，如图 3 所示。感应区域是平行于参考平面的圆形区域，以参考传感器为中心，直径为 $2L_{probe}$ 。流入区域是由校准中使用的风向扇区定义的扇形区域，其半径为 $L_{ref} + 15L_{probe}$ 且顶点位于机舱激光雷达处。

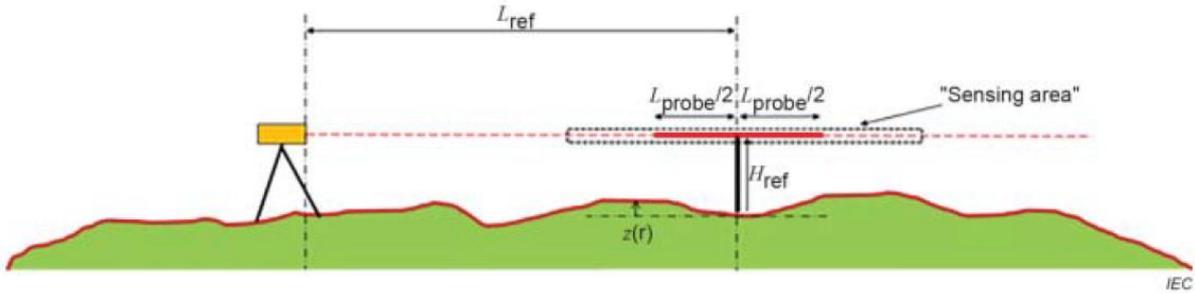


图 2 - 校准设置示意图（侧向视图）

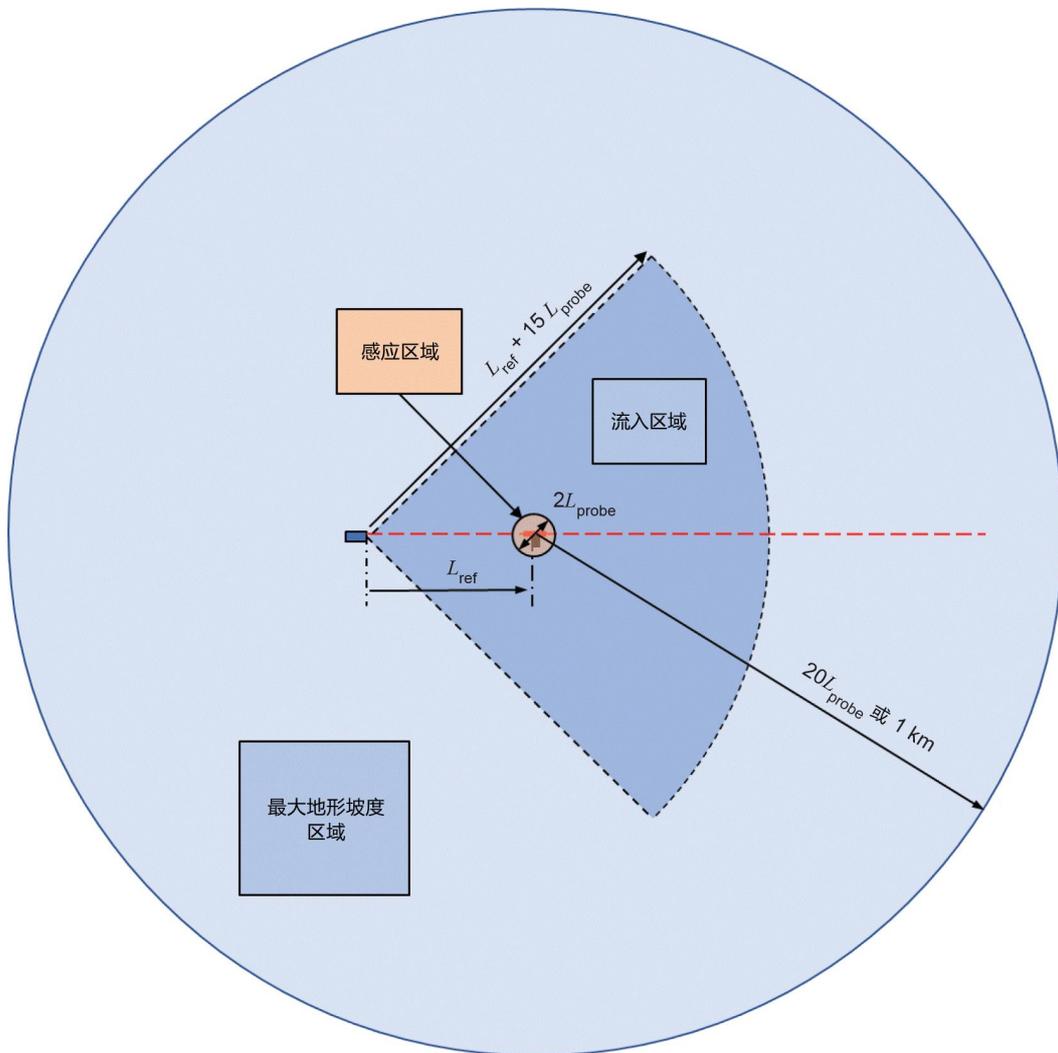


图 3 - 感应和流入区域俯视图示意图

7.5.2.2 地形要求

校准场地应平坦，并满足以下要求：

- 地形坡度:在以探测长度的中间为圆心,半径为 1 公里)或 $20L_{probe}$ (这两个的最大值)的圆内,将平面拟合到一个分辨率为 30 米或更高的数字地形模型上。平面坡度不得超过 1%。
- 平均地形坡度:对于流入区域内,但在感应区域外的每个点,计算坡度 $s = z/d$, 其中 z 为相对于参考平面的地形高度, d 为地形位置到校准杆的水平距离。建议使用分辨率为 30 米或更高的数字地形模型。地形坡度平均值的绝对值 s 不得超过 1%。
- 高度变化量:
在感应区域内,地形高度 z 变化量不得超过 $\pm H_{ref}/20$, 即 $|\max z - \min z| \leq H_{ref}/20$ 。
在流入区域内但在感应区域外,高度变化量不得超过这些限制:

$$\begin{aligned} |\max z| &\leq H_{ref}/10 \\ |\min z| &\leq H_{ref}/10 \end{aligned}$$

其中校准杆位置的地形高度 $z=0$ 。

7.5.2.3 粗糙度变化

在流入区域内不应有较大的粗糙度变化(土地用途或土地类型变化)。

7.5.2.4 障碍物

不允许障碍物(包括树木和灌木丛)在感应区域造成明显的尾流或部分尾流。障碍物的影响由其高度决定,如下:

- 在感应区域内,如果障碍物高度大于 $H_{ref}/10$,则认为障碍物影响较大。
- 在流入区域内和感应区域外,如果障碍物高度大于 h ,则认为障碍物影响较大,其中 $h(r)$ 为到校准杆距离的线性函数,定义为

$$h(r) = \frac{H_{ref}}{10} \left((r - L_{probe}) \frac{1}{6L_{probe}} + 1 \right) \quad (5)$$

因此:

$$\begin{aligned} h(r = L_{probe}) &= H_{ref}/10 \\ h(r = 15 L_{probe}) &= H_{ref}/3 \end{aligned}$$

如果障碍物到任何测量点(参考传感器或激光雷达探针体积)的距离大于 20 个风轮等效直径 De ,则允许存在,且

$$De = 2 * \frac{l_h * l_w}{l_h + l_w} \quad (6)$$

其中 l_h 和 l_w 分别是障碍物的高度和宽度。

例如,第二座测风塔的边长为 0.2 米,高度为 30 米,其等效直径为 0.4 米,因此必须与另一座塔保持至少 8 米的距离。

7.5.3 安装要求

激光雷达应安装在地面或坚硬的高架平台上。支架和平台的设计应防止激光雷达的偏斜超过 $\pm 0.1^\circ$ 或 LOS 和参考仪器之间的最大高度变化为参考高度的 $\pm 1\%$ (这两者中的最小值)。

需校准的光束应精确指向安装在桅杆上的参考仪器。用于测量和校准 V_{hor} 和 θ 的参考仪器应进行校准,并符合 GB/T 18451.2-2021 (第 7 条)中关于校准、安装和操作特性的要求。参考仪器应包括:

- 一个风杯式风速计或 3D 超声波风速计用于测量 V_{hor} ;
- 一个 3D 超声波风向传感器或风向标用于 θ 的测量 (用于确定相对风向)
- 一套备用风速和风向测量装置用于主设备的质量控制。
- 入流角或垂直风速的测量 (用于数据过滤)

可供选择的参考仪器还应包括 (推荐):

- 不同高度的水平风速测量,用于切变测量 (与主传感器 V_{hor} 类型相同);

- 温度传感器，用于过滤掉低于给定温度阈值的数据，以剔除受参考传感器上结冰或轴承摩擦漂移影响的数据。不排除检测参考仪器故障或性能退化（结冰影响）的替代传感器或方法，但是需要在激光雷达校准报告中记录；
- 需要压力和湿度传感器来确定校准对环境变量的灵敏度，和/或检查 V_{hor} 传感器是否在等级限制内。

传感器应以下列方式之一安装：

- 在同一测风塔上，通过以下方式之一：
 - 单个顶部安装（GB/T 18451.2-2021 的第 G.2 条），
 - 并排顶部安装（GB/T 18451.2-2021 的第 G.3 条），或
 - 遵循 GB/T 18451.2-2021 的第 G.4 条和以下更严格要求的侧面安装布置。
- i) 由于风速计将受到桅杆、安装臂和可能的拉线的影响，根据 GB/T 18451.2-2021 的附录 S，应使用相同高度的第二个风速计来进行阻塞校正。
- ii) 风速计到测量桅杆中心的最小距离应确保桅杆对风速计风速读数的影响在整个测量扇区内保持小于 1%。
- iii) 风向与风速传感器的高度差不得大于 2 米；

在两个独立的测风塔上，每个测风塔都应是顶部安装方案（GB/T 18451.2-2021 的第 G.2 条），其中参考风速和风向传感器高度相同。两个测风塔之间的水平距离不应大于 10 米。

最后，校准活动期间使用的测量扇区中的风向范围，校准布局应确保桅杆不会对校准时通过激光雷达探测长度的流场产生明显的影响（例如风杯式风速计或桅杆或吊杆的尾流不应影响探测长度中的风况）。

光束仰角（从水平面开始计算） φ 应尽量小，不得大于 10° 。

光束应靠近参考风速计。光束位置高度应在参考风速计高度的 1% 以内，并且在 2 至 5 米的水平距离内。应及时报告光束位置和不确定度。

7.5.4 校准范围

激光雷达校准的测量设置应尽可能接近其后续应用中的测量设置。

测量距离 R_{conf} 被定义为激光雷达与光轴正交的平面（如果其存在的话，即激光雷达轨迹的对称轴）之间的距离，因此

$$R_{conf} = R \cdot \cos \delta \quad (7)$$

其中，

R 为沿 LOS（不是水平距离）从激光束原点到参考仪器的距离。 $R = L_{ref}/\cos\varphi$ ， L_{ref} 为激光束原点到参考仪器的水平距离， φ 是激光束的仰角（对于校准后的 LOS）；

δ 为光轴和待校准的 LOS 之间的角度。

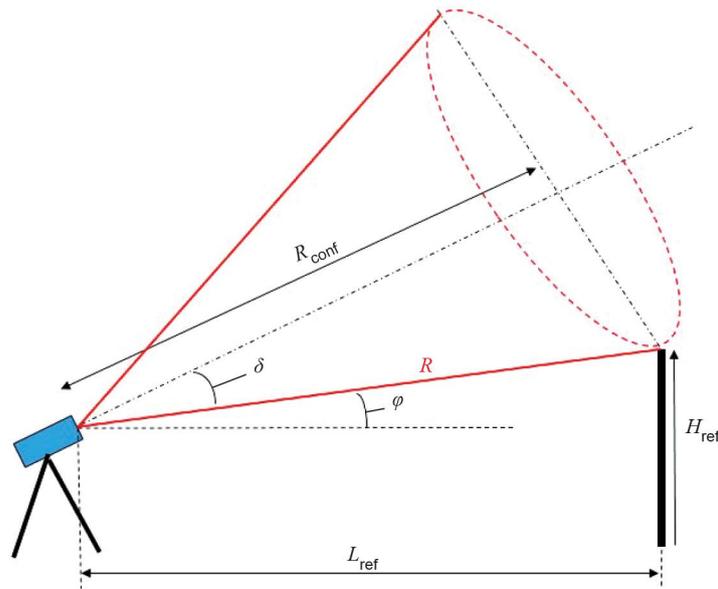


图 4 - 校准设置草图

7.5.5 校准数据要求和过滤

V_{ref} 的定义(公式(4))基于 V_{hor} 、 θ 和 $\varphi V_{hor} \sin \theta V_{hor} \cos \theta$ 的 10 分钟矢量平均测量值。用于分析的数据集应根据以下标准进行过滤：

- V_{hor} 应在风速计校准的范围内（通常在 4 m/s 和 16 m/s 之间）
- θ 应在 LOS 方向周围的扇区内（ $\theta_{LOS} \pm 40^\circ$ 或建议更小）。扇区限制应根据场地特征（见 7.5.2）、方向传感器几何形状和场地无障碍物尾流的方向决定。狭窄的扇区非常适合 NML 的正常运行条件，因为相对于风力发电机组偏航位置的风向通常很小。然而，狭窄的扇区通常会增加执行校准所需的时间。
- 平均周期内应有高质量和足够数量的数据。例如应用基于 V_{LOS} 可利用率和/或高于阈值的 CNR 的筛选条件。具体指标和阈值取决于现场的激光雷达类型和气溶胶分布。
- 对于扫描激光雷达中的 LOS 选择，激光雷达 LOS 应在给定的方位角和/或仰角扇区内；
- 发生故障或降级（例如由于结冰）时间段的测量数据应被丢弃
- 由于入流角造成的 LOS 速度的相对误差，由下式给出

$$\epsilon_v = \tan \psi \tan \varphi \quad (8)$$

其中， ψ 为风入流角， φ 为光束仰角。应对入流角进行筛选，使 ϵ_v 的大小不超过 0.002。由于水平风速测量的精度也随着入流角的增加而降低，因此无论激光雷达光束仰角如何，都建议根据入流角度进行过滤。

激光雷达测量和参考仪器应时间同步。允许 $\pm 1\%$ 的同步容差，即根据 GB/T 18451.2-2021，对于 10 分钟平均间隔为 ± 6 秒是可接受的。

收集数据直到满足 7.5.7 中定义的要求。

7.5.6 视向方向评估

7.5.6.1 总则

应评估视向方向，这可以分两步完成。首先，将激光雷达对风向的响应拟合到一个函数中，从而得到一个近似的视向方向。接下来，应用基于残差平方和（RSS）的处理流程，得到视向方向的最终值。这种方法的优点是 θ_{LOS} 的数值是在参考风向传感器的参考坐标系内获得的。

7.5.6.2 拟合激光雷达对风向的响应

通过将归一化的激光雷达视向风速($V_{LOS, NORM}$)拟合为风向(θ)的函数，来评估视向方向的一级近似值。在本分析中，除现场特殊情形（例如，塔影、障碍物、相邻风机的尾迹等）外，所有风向扇区均有效。标准化之后的视向风速为：

$$V_{LOS, norm} = \frac{V_{LOS}}{V_{hor} \cos \varphi} \quad (9)$$

拟合函数 f_{fit} 为：

- 外差激光雷达采用余弦波： $f_{fit,1} = A_1 \cdot \cos(\theta - \theta_0) + B_1$ ；
- 零差激光雷达采用校正余弦波： $f_{fit,2} = A_2 \cdot |\cos(\theta - \theta_0)| + B_2$ 。

拟合后得到 $A_{1,2}$ ， $B_{1,2}$ 以及 θ_0 的最佳估计值。理想情况下， $A_{1,2} = 1$ ， $B_{1,2} = 0$ ， θ_0 是 θ_{LOS} 的近似估计。图5展示了标准化风速随风向变化的示例以及余弦拟合的结果。

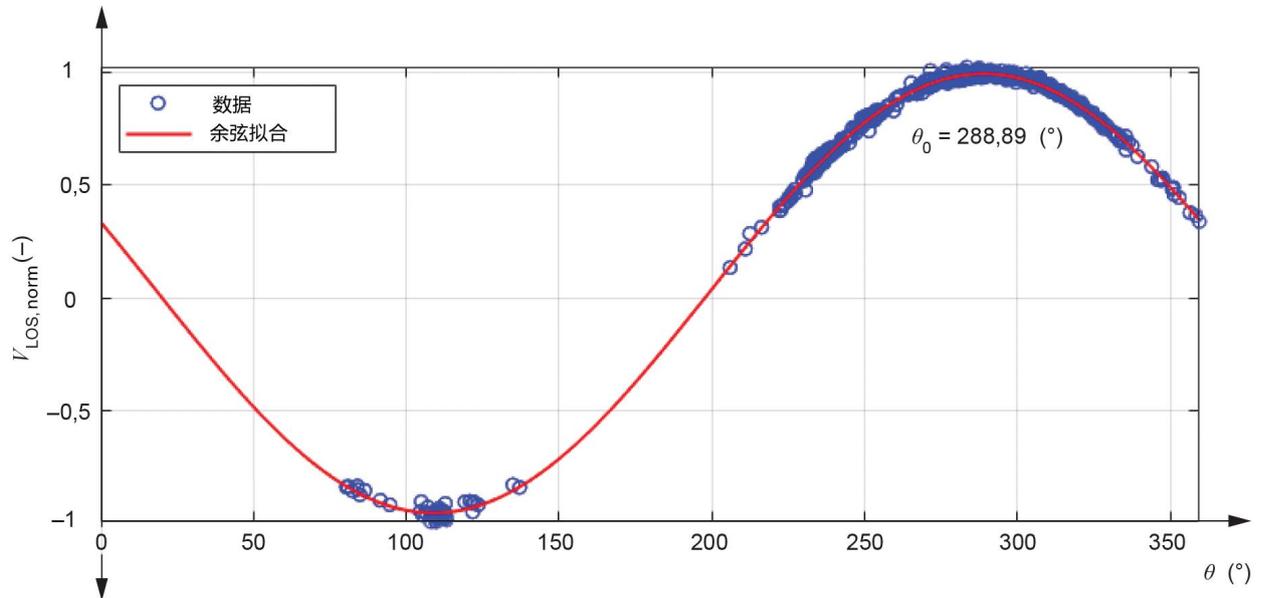


图 5 - 激光雷达对风向的响应和余弦拟合示例

7.5.6.3 基于残差的 LOS 方向估计方法的优化

进一步使用统计过程来优化对 θ_{LOS} 的估计：

- 1) 取 20 个 θ_{proj} ($\theta_{proj,i}; i = 1..20$)，这些值以 θ_0 为中心、增量为 0.1° 分布：
 - a) 评估所有 10 分钟数据的 $V_{ref,i}$ ，如下所示：

$$V_{ref,i} = V_{hor} \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\theta - \theta_{proj,i}) \quad (10)$$

- b) 对 V_{LOS} 和 $V_{ref,i}$ 进行线性回归计算

$$V_{los,fit,i} = a V_{ref,i} + b \quad (11)$$

- c) 计算 $RSS_i = \sum_k^N (V_{los} - V_{los_fit,i})^2$
- 2) 绘制 RSS_i 随 $\theta_{proj,i}$ ($i = 1 \dots 20$) 的变化曲线
 - 3) 拟合到二阶多项式 (参见图 6 中的示例)。
 - 4) θ_{LOS} 是最小 RSS 对应的投影角度。这是第 7 条其余部分所述流程中将要用到的值, 特别是用于根据式 (4) 计算 $V_{ref} = V_{hor} \cdot \cos \varphi \cdot \cos (\theta - \theta_{LOS})$ 。

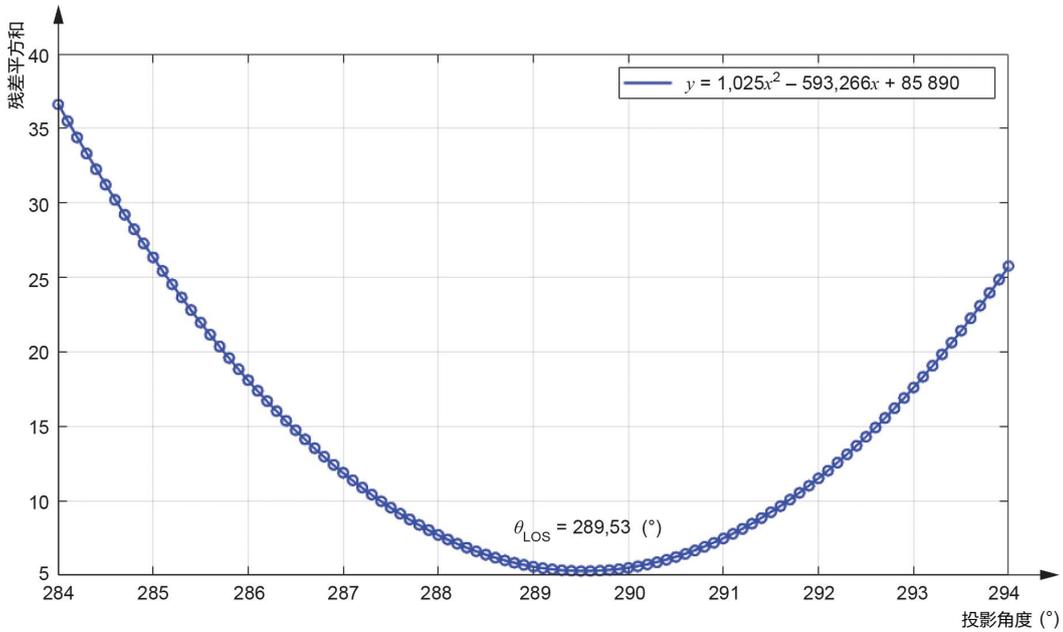


图 6 -使用 RSS 过程的 LOS 评估示例: RSS 与 θ_{proj}

7.5.7 数据的区间划分和数据库要求

建议首先制作整个过滤后的 10 分钟数据集 V_{LOS} 对 V_{ref} 的散点图, 以便直观地识别异常值, 并在必要时进行调查。然后基于 0.5 m/s 的 V_{ref} 区间宽度和以 0.5 m/s 的倍数为中心的区间对有效数据进行分仓。

如果一个区间包含至少五个数据点, 则它被认为是完整的。数据库在以下情况下被认为是完整的:

- 每条光束校准得到 300 个有效数据点;
- 4 m/s 到 12 m/s 中的所有区间都已完成。请注意, 风洞中通常的风速校准范围为 4-16m/s。然而, 在机舱激光雷达校准中, 在特定的 LOS 方向上获得大于 12m/s 的风速可能相当耗时。有时, 即使完成速度达到 12 m/s 也可能难以实现 (例如, 低风季)。在这种情况下, 校准范围可能必须减少到 4-10 m/s。应对此做偏差报告。此外, 应将额外的不确定度分量应用于重构的风速。

7.6 LOS 速度测量的不确定度

7.6.1 总则

因为 LOS 速度是根据 V_{ref} 校准的, V_{LOS} 的不确定度来自于三方面不确定度的组合, 分别是: V_{ref} 不确定度、 V_{LOS} 和 V_{ref} 之间偏差的统计不确定度以及公式 (4) 中因忽略风的垂直分量所引起的不确定度。

7.6.2 V_{ref} 的不确定度

7.6.2.1 总则

如公式 (12) 所示, 参考风速是 V_{LOS} , φ , θ 以及 V_{LOS} 的函数 (式中 $\theta_r = \theta - \theta_{los}$ 是相对于视向方向的风向), 在最一般的情况下, 可以合理地假设这些变量的不确定度是不相关的, V_{ref} 的合成不确定度可以表示为:

$$u_{V_{ref}} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{ref}}{\partial V_{hor}}\right)^2 u_{V_{hor}}^2 + \left(\frac{\partial V_{ref}}{\partial \varphi}\right)^2 u_{\varphi}^2 + \left(\frac{\partial V_{ref}}{\partial \theta_r}\right)^2 u_{\theta_r}^2} \quad (12)$$

灵敏度系数按下式计算:

$$\frac{\partial V_{ref}}{\partial V_{hor}} = \cos \varphi \times \cos \theta_r \quad (13)$$

$$\frac{\partial V_{ref}}{\partial \varphi} = -V_{hor} \times \sin \varphi \times \cos \theta_r \quad (14)$$

$$\frac{\partial V_{ref}}{\partial \theta_r} = -V_{hor} \times \cos \varphi \times \sin \theta_r \quad (15)$$

不确定度和灵敏度系数可根据区间平均值¹计算。对于角度值, 建议使用角度值的平均值, 即 $\cos(\text{avg}(\theta_r))$ 。

所有不确定度均表示为含有单位包含因子 ($k=1$) 的标准不确定度。如果实际应用时需要扩展不确定度, 请参考 GB/T 18451.2-2021 的 E.2.2 节。

7.6.2.2 水平风速不确定度

V_{hor} 的不确定度是参考风速传感器不确定度和由于参考传感器测量的空间尺度与被校准的 LOS 方向不完全相同而产生的不确定度的组合:

$$u_{V_{hor}} = \sqrt{u_{sens}^2 + u_{pos}^2} \quad (16)$$

用于测量水平风速的参考传感器的不确定度应根据 GB/T 18451.2-2021 进行计算。

$$u_{sens} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{ope}^2 + u_{mast}^2 + u_{lgt}^2 + u_{daq}^2} \quad (17)$$

其中, 与参考风速传感器相关的不确定度来源如下:

u_{cal} 是用于测量 V_{hor} 的参考传感器的校准不确定度。 u_{cal} 是通用的, 不但包括预校准不确定度, 而且包括与传感器现场检测和/或传感器后校准相关的不确定度;

¹ 理论上, 用 10 分钟的值计算不确定度和灵敏度系数, 然后求平均值会更准确。上述建议用于实际目的, 以便无需数据库即可重现不确定度校准结果。

u_{ope} 是用于测量 V_{hor} 的参考传感器的运行（也称为分级）不确定度

u_{mast} 是由于安装用于测量 V_{hor} 的参考传感器而产生的不确定度；

u_{igt} 是与引闪器相关的不确定度，如果有引闪器的话；

u_{daq} 是用于测量 V_{hor} 的参考传感器的数据采集不确定度。

由参考传感器的相对位置和不同测量尺度（与校准的视向探针体积相比）引起的不确定度表示为：

$$u_{pos} = \sqrt{u_{probe}^2 + u_{inc}^2 + u_{vert_pos}^2} \quad (18)$$

式中，

u_{probe} 是在雷达探针体积内因风速改变引起的不确定度。它起因于沿着探针体积风速的水平方向上的变化，这主要由地形效应引起，在倾斜的 LOS 场景，它额外地起因于在由探针长度覆盖的高度范围中的非线性风切变。推荐在独立于校准高度和探针长度时估计这个不确定度。这个不确定度通常随减少的校准高度、增加的探针长度而增加。在倾斜的 LOS 场景，这个不确定度应在独立于在参考测风塔处测得的风切变时被估计。这个不确定度通常随增加的 LOS 高度角而增加。作为替代方案，这个不确定度能从在围绕匹配参考测风塔的各测量距离处进行的校准中被估计。对于水平 LOS 和倾斜的 LOS， u_{probe} 的典型值分别为 0.1% 和 0.2%。

u_{inc} 是由倾斜的 LOS 和测量距离引起的不确定度。

与 LOS 倾斜有关的最重要的误差（除在 u_{vert_pos} 中考虑的对准误差之外）是由测量距离误差引起的。即使激光光束正好经过参考传感器，如果存在距离误差，则测到的高度也将是错误的。因此，对于倾斜的 LOS，距离误差会导致高度误差。利用一个简单的幂律模型，由倾斜引起的不确定度为：

$$u_{inc} = \frac{\alpha \times \sin \varphi \times u_{range} \times V_{hor}}{H_{ref}} \quad (19)$$

式中 α 是剪切指数， φ 是倾角， u_{range} 是距离不确定度， H_{ref} 是测量参考高度。 u_{range} 可以通过测量距离验证中进行估算（参考 7.4 节）。

与距离不确定度相关的另一个不确定度被关联到探针体积中心相对于参考测量位置的水平位移。地形效应能在两个位置处的风速中引起差异，并能引起参考测量的不确定度。在与测量高度相比是大的距离不确定度的场合，这个不确定度能成为主要影响，并应通过与探针长度的不确定度（ u_{probe} ）相似的方式进行估计。

u_{vert_pos} 是由参考传感器和 LOS 方向之间的高度差引起的不确定度（对准误差——注意，该不确定度也适用于水平光束）。

例如，使用幂律和剪切指数 α 建立垂直剪切风廓线，同时使用参考仪器的高度 H_{ref} 以及在激光束位置的不确定度 u_H ，可得到相应的风速不确定度：

$$u_{vert_pos} = \frac{\alpha \times u_H \times V_{hor}}{H_{ref}} \quad (20)$$

式中， α 既可以是校准过程中测量的平均风切变指数（如果切变测量可用），也可以是现场的典型值。

在垂直定位中有 3 个不确定度来源：

在安装期间，源自雷达的非理想定位的高度误差。这个不确定度是重要的，特别是在小的标定高度 H_{ref} 的情形中。

雷达俯仰角可能的系统性漂移，例如由于系统性的风载或时间中的系统性漂移。应在雷达俯仰的倾角仪测量结果的改变（随风速的变化和时间中的变化）的基础上评估这个不确定度。这个不确定度能容易地成为决定性的，特别对于安装在平台上的雷达或低校准高度的情形。

雷达可能的振动。该不确定度通常不重要，可被忽略。

应单独评估源自前两个不确定度来源的不确定度分量，并且在这两个不确定度分量相互独立的假设下进行叠加。

7.6.2.3 相对风向不确定度

相对风向的不确定度为

$$u_{\theta_r} = \sqrt{u_{\theta}^2 + u_{\theta_{los}}^2} \quad (21)$$

式中，

u_{θ} 是风向传感器的不确定度。该不确定度可根据 GB/T 18451.2-2021 计算，因为视向方向是在参考传感器的参考系内计算的，因此 u_{θ} 不包括指北标志、安装横杆朝向和地磁偏移的不确定度，因为 LOS 方向是在传感器的参考的框架内被计算的。这通常仅是由风向传感器的校准残余引起的不确定度。

第二个不确定度来源是在校准期间雷达俯仰角的可能的系统性漂移，例如由于系统性风载或时间中的系统性漂移引起。应基于在校准期间对雷达俯仰角的监测评估这个不确定度。它应被考虑成独立于由雷达安装引起的倾斜角的不确定度，即两个不确定度分量应以平方求和的方式累加。

$u_{\theta_{LOS}}$ 是 LOS 方向的不确定度，与 θ_{LOS} 的统计估计有关，如 7.5.6 中所述的方法，该不确定度估计为 0.1° 。

7.6.2.4 光束仰角不确定度

u_{φ} 表征水平风速投影到视向方向时，所用到的角度的不确定度，其来源包括：

- 倾角仪的校准——对于激光雷达安装在平台上的测试配置，可将倾角仪读数与激光雷达高度相结合，用于获得投影中使用的光束仰角值；
- 或者直接测量 φ 的不确定度 —— 对于激光雷达安装在地面或非常稳定的平台上的测试配置， φ 可通过直接测量（例如经纬仪）获得。

7.6.3 入流角不确定度

（在根据式（4）的） V_{ref} 评估中，忽略了风矢量的垂直分量。被忽略的项被当作是由于气流倾斜引起的在 V_{ref} 中的一个不确定度分量：

$$u_{\psi_i} = W \times \sin\varphi_i = V_{hor} \times \tan\psi_i \times \sin\varphi_i \quad (22)$$

式中，

u_{ψ_i} 为由于气流倾斜在 V_{LOS} 中引起的不确定度；

W 为垂直风速分量；

φ 为光束仰角；

V_{hor} 为水平风速；

ψ_i 为入流角，被估计成 $\tan^{-1}(w/V_{hor})$ 。入流角 ψ_i 的区间平均值能被用来估计 ψ_i 。

7.6.4 视向速度测量不确定度

每个风速区间中 V_{LOS} 的测量不确定度表达式为

$$u_{V_{LOS}} = \sqrt{u_{V_{ref}}^2 + [V_{hor} \times \sin(\varphi) \times \cos(\theta_{r,i})]^2 \times u_{\psi_i}^2 + \frac{\sigma_{dev}^2}{N}} \quad (23)$$

式中：

$u_{V_{ref}}$ 是公式（12）中校准的参考风速的不确定度；

σ_{dev} 是区间中差值 $\Delta V = (V_{LOS} - V_{ref})$ 的标准差（ ΔV 每间隔 10 分钟计算一次，然后（在视向速度区间内）计算其标准差）；

N 是区间中的数据数量；

u_{ψ_i} 是入流角不确定度（见 7.6.3）。

表 2 总结了所有视向方向校准不确定度分量，包括它们的不确定度类型。

表 2 校准不确定度分量汇总

编号	不确定度分量	类型	描述
参考风速计			
1	校准不确定度, u_{cal}	B	IEC 61400-12-1:2017 标准中参考风速计传感器的校准不确定度
2	使用特性, u_{ope}	B	IEC 61400-12-1:2017 标准中的风速计等级
3	安装, u_{mast}	B	风速计的安装不确定度
4	引闪器, u_{lgh}	B	由于引闪器引入的参考风速计不确定度
5	数据采集, u_{daq}	B	数据采集系统不确定度
激光雷达探针长度			
6	场地影响, u_{terr}	B	激光雷达探针长度内的水平气流变化
高度误差			由风切引起的测量误差
7	安装, u_{vert_pos}	B	由光学头安装引起的参考风速计和视向方向之间的高度差
8	测量距离, u_{inc}	B	由测量距离误差导致的参考风速计和视向方向之间存在高度差

相对风向 u_{θ_r}			
9	参考风向传感器, u_{θ}	B	线性偏差和其他设备不确定度
10	激光视向方向计算, $u_{\theta_{los}}$	B	7.5.6 中的过程不确定度
投影误差			投影过程中的角度误差
11	安装, u_{φ}	B	倾角仪的校准不确定度或直接测量 ϕ (例如经纬仪) 的不确定度
12	流动倾斜, u_{ψ}	B	由于忽略 $W \cdot \sin\phi$ 影响的不确定度
校准测量			
13	统计不确定度	A	$\sigma_{dev} \sqrt{N}$

7.7 校准结果

V_{LOS} 与 V_{ref} 之差的平均值 ΔV 应在每个区间内分别计算, $\Delta V = V_{LOS} - V_{ref}$ 。应使用表 3 中的格式报告校准结果。

可根据校准结果修正机舱激光雷达视向速度。如果区间内经过平均处理的偏差 (ΔV) 大于任意风速区间内的不确定度 u_{ref} , 则修正是强制性的。修正应基于区间内经过平均处理的参考风速和区间内经过平均处理的激光雷达视向风速之间的线性回归。如果 $|\Delta V| < u_{V_{LOS}}$, 视向风速的修正则是可选的。

表 3 校准表格示例

区间号 i	V_{ref} (m/s)	V_{LOS} (m/s)	N	ΔV (m/s)	$\sigma_{\Delta V}$ (m/s)	$u_{V_{ref}}$ (m/s)	$u_{V_{LOS}}$ (m/s)
7	4.04	4.13	13	0.10	...	0.05	...
8	4.51	4.57	20	0.06	...	0.06	...
9	4.98	5.05	31	0.07	...	0.06	...
10	5.45	5.51	12	0.06	...	0.07	...
11	5.98	6.08	22	0.10	...	0.07	...
...
23	12.01	12.05	30	0.04	...	0.12	...
24	12.47	12.58	6	0.11	...	0.12	...
25	12.95	13.01	14	0.06	...	0.12	...

26	13.53	13.63	20	0.11	...	0.13	...
27	13.95	14.01	12	0.05	...	0.13	...
28	14.49	14.56	7	0.08	...	0.13	...
29	15.01	15.05	5	0.04	...	0.14	...

当几个视向速度完成校准后，一个包含所有已校准视向不确定度的表格应作为结果的一部分。此表应在不同列中分别说明不同视向方向的风速之间、相关和不相关的不确定度。作为一个例子，下表 4 给出了校准 N 个视向方向的风速时所需的强制性内容。校准两个视向方向的风速的详细示例见附录 A。

表 4 校准表格示例 (n = 1..N; N 为待校准的视向方向的总数)

区间号 i	$u_{corr,1}$	$u_{uncorr,1}$...	$u_{corr,n}$	$u_{uncorr,1}$	$u_{corr,N}$	$u_{uncorr,N}$

对于第 n 个视向方向， $u_{corr, n}^2$ 是光束之间相关项不确定度的平方和。

对于第 n 个视向方向， $u_{uncorr, n}^2$ 是光束之间不相关项的平方和。

7.8 校准报告要求

7.8.1 报告内容

校准报告应提供 7.8.2 至 7.8.6 中列出的信息。

7.8.2 激光雷达通用信息（按照 7.1 节）

- 激光雷达设备：型号、制造年份、序列号、固件标识、光束配置、扫描几何结构；
- 距离门设置。

7.8.3 光束轨迹/几何验证（按照 7.2 节）

- 角度的定义，例如锥角、两个共面视向方向之间的半开角/全开角等；
- 测量设置描述；
- 角度测量方法说明；
- 测量设备说明；
- 结果表格：测量的角度、报告的不确定度以及与制造商规格的兼容性。

7.8.4 倾角仪校正（按照 7.3 节）

- 测量设置描述
- 方法说明；
- 测量设备说明；
- 结果表格：名义俯仰角 ($\tau_{indicated}$) 和名义翻滚角 ($\rho_{indicated}$)，测量的参考测量值 ($\tau_{measured}$, $\rho_{measured}$) 以及报告的不确定度；
- 绘制名义俯仰角和名义翻滚角随着测量俯仰角和测量翻滚角的变化曲线图。

7.8.5 感知范围核实（按照 7.4 节）

- 测量设置描述
- 方法说明；
- 测试设备说明；
- 距离范围确认结果。

7.8.6 视向速度校准（针对每个视向方向）

- 现场描述（7.5.2），包括现场的全景照片；
- 测量设置说明（7.5.3）；
- 参考设备说明，包括：传感器类型和序列号、校准、测风塔布置示意图；
- 激光雷达和激光雷达探测长度相对于参考设备的位置；
- 视向风速对中方法；
- 激光雷达设置说明，包括测量距离范围（7.5.4）、相对于 UTC 的时间基准和与参考设备同步的方法；
- 测量的光束位置和不确定度
- 数据采集起止时间；
- 用于测量数据库的筛选过滤器（方法）说明（7.5.5）；
- 确定视向方向和所获得视向风速的方法描述（7.5.6）；
- 对于每个LOS速度，因 V_{ref} 为因变量（y）、以 V_{Los} 为自变量（x）的标定函数。标定函数为最小二乘拟合，也要报告 R^2 值；
- 一张包含 ΔV 和 $\pm u_{V_{ref}}$ 随 V_{ref} 变化的图；
- 对于每个 LOS 校准
- ，雷达倾斜角和滚转角的时间序列图；
- 包含校准结果和不确定度的表格（7.7）
- 包含所有已完成视向校准的不确定度表，在不同列中展示不同视向方向的风速之间、相关和不相关的不确定度。

8 由于环境条件的变化引起的不确定度

8.1 总则

激光雷达的校准（如第 7 章所述）建立了在特定环境下进行测量风速的不确定度。在 SMC 期间的环境条件与校准期间遇到的将有所不同，因此引入了进一步的测量不确定度。

通过分析环境变量（EVs）对测量准确度的影响，评估这种额外测量的不确定度。这个过程由两个阶段组成：

- 评估由于 EVs 变化对中间值的测量结果的不确定度的贡献（见 8.2 节）；
- 确定 EVs 可被视为对 WFR 模型无影响的运行条件范围（见 8.3 节）。

EVs 对测量准确度的这种影响，可以认为是一种特定型号激光雷达（包括硬件、软件），及其在特定运行条件下配置的特征。上述过程可以应用到每个激光雷达模型。

8.2 由于环境条件的变化引起的中间值不确定度

8.2.1 文档记录

对于每个重要的环境变量，应评估由于环境条件的变化对每个中间值的测量不确定度的贡献。激光雷达制造商应以独立审查方式提供该评估的详细情况。

8.2.2 方法

8.2.2.1 总则

每种不确定度贡献的评估方法，取决于环境变量和中间值。评估可以通过实验室测试、仿真或使用理论分析进行。

每个环境变量都应在至少涵盖预期或测量值的范围内评估，形成支撑 WFR 模型充分的证据基础（参考 8.3 节）。如果通过实验评估 EV 变化引起的不确定度，可能需要多次测试才能涵盖所需的值范围。

8.2.2.2 通过敏感性分析的不确定度评估

由于环境条件的变化，对中间值测量的不确定度的贡献可以通过灵敏度分析来评估。中间值精度对 EV 的灵敏度定义为中间值误差对该 EV 变化的变化率。

通过将灵敏度乘以合适的范围来估计对中间值不确定度的相关贡献。如果在校准和 SMC 期间都测量了 EV，则可以将 EV 平均值之间的绝对差值作为该范围。如果未测量 EV，则使用的范围应是最大范围的估计值（如 GB/T 18451.2-2021 表 L.3 中所示）除以 $\sqrt{6}$ （GB/T 18451.2-2021 附录 L.2.7 节中的除数和附录 L.4.4 节中的除数的乘积）。

8.2.2.3 视向风速的敏感性测试

LOS 速度对环境变量变化的敏感性可以通过类似于 GB/T 18451.2-2021 第 L.2 节中描述的灵敏度测试来评估（尽管该文件中的敏感性定义与上面给出的略有不同）。在这样的测试中，LOS 速度与每个 EV 值的范围内的参考风速值进行比较

在此类测试中应满足以下实验条件如下：

- 场地和安装应遵循 7.5.2 节和 7.5.3 节的要求，至少需要 1080 个数据点，并且风速区间覆盖 4m/s 到 12m/s 范围，其中每个风速区间（0.5m/s 宽度）至少需要 5 个数据点；
- 在可能的情况下，应使用参考传感器（不是被测试的激光雷达）测量参考参数。如果激光雷达报告了后向散射强度的测量结果，则可被用来评估气溶胶密度。

8.2.3 要考虑的环境变量列表

至少需要考虑以下几项环境变量（EV）：

- 空气温度，气压，相对湿度，空气密度；
- 云基高度；
- 气溶胶密度（例如通过后向散射强度测得）；
- 湍流强度；
- 在激光雷达探测体积内线性风速变化；
- 在激光雷达探测体积内风速的非线性（如幂次定律）变化；
- 在 10 分钟周期内的数据可用性。

请注意，并非所有这些 EV 都会影响每个中间值（例如，俯仰传感器的校准精度预计不会对气溶胶密度敏感）。环境变量列表并非详尽无遗，可根据适当的技术原理加以扩展。

8.2.4 不确定度贡献的重要性

如果 EV 对中间值测量不确定度的贡献小于第 7 章所述校准不确定度（ $k=1$ ）的一半，则该贡献可考虑忽略不计。

8.3 循证支持 WFR 充分性

WFR 模型可能对某些环境变量敏感，与中间值的灵敏度无关。由于没有既定的方法来评估这种敏感性，本文件提供了 WFR 对环境变量不敏感的标准。该标准基于循证，包括机舱激光雷达进行的风速测量（最终值，而不是中间值）与可接受的校准参考进行的风速测量之间的比较。

循证应包括至少 5 次测试，测试中至少有 2 个被测激光雷达应安装在正常运行的 WTG 上，其余的测试，激光雷达可以安装在地面上或固定平台上。

一个成功的测试包括：

- 至少 600 个 10 分钟平均数据点；
- 8 m/s 以上风速至少 150 个 10 分钟平均数据点；
- 8 m/s 以下风速至少 150 个 10 分钟平均数据点；
- 对于安装在风力发电机组机舱上的激光雷达的测试：
 - 对于至少有 6 组 10 分钟数据点的所有区间，与参考测量值的逐仓平均偏差应落在参考测量值的不确定度（ $k=1$ 的包含因子）内；
- 对于安装在地面上或固定平台上激光雷达的测试：
 - 在测量结果之间的单个参数回归应展示在 0.98 到 1.02 之间的回归斜率，以及至少为 0.97 的可决系数（ R^2 ）。

建立循证的可接受的参考仪器包括：

- 按照 GB/T 18451.2-2021（第 7 章）的要求安装和运行的 1.7A 或 1.7C 级以上的风杯式风速计，或者
- 根据 GB/T 18451.2-2021 附录 L 的要求校准和分类的地面式激光雷达，或者
- 符合本文件要求的一台独立的、作为参考的机舱式激光雷达。

以下要求适用于循证中的机舱安装试验：

- 机舱雷达运行应被限制在如本文件 10.4.1 节定义的、测量结果不受运行 WTG 或障碍物影响的扇区内；
- 对于一个给定的扇区，地形应符合 GB/T 18451.2-2021 Table B.1 中对于被测 WTG 或风速测量装置（WME）位置的要求（进一步的描述见 10.4.2 节）。

在循证中至少在一次测试中，应满足以下各项要求：

- 被测的激光雷达曾安装在风力发电机组上，该机组的轮直径在新的测量活动中风力发电机组叶轮直径的 30% 范围内；
- 在测试中使用的测量距离在新的测量活动中使用的测量距离的 0.5 倍（新的测量活动中使用的风力发电机组的）叶轮直径范围内；
- 测量高度在新的测量活动中的风机轮毂高度的 30% 范围内。

8.4 报告的要求

应列出支持假设由于环境对 SMC 中的特定激光雷达的 WFR 影响而对测量不确定性的贡献为零的证据基础。中间变量的敏感性应记录在案。

激光雷达制造商应出具一份至少包含以下内容的敏感性分析报告：

- 制造商名称、模型类型及版本号
- 报告日期
- 报告版本历史
- 作者、审核人和授权人姓名

- 激光雷达的描述
- 所列环境变量的敏感性
- 用来达到灵敏度值的方法描述
- 保持灵敏度有效的变量范围
- 其它额外灵敏度的数值，以及确定它们的方法
- 循证总结

如果观察到任何表明不确定性评估不完整的测量差异，应将这些差异报告给循证和敏感性分析报告的作者，该报告应修改为：

- 完善操作条件的描述以排除出现差异的条件，重新编译证据库，如果循证仍然满足要求，则进一步将测量限制在新的循证支持的范围内。

如果影响仅限于中间变量，则通过包含额外的 EV 来适应敏感性分析过程中出现差异的条件。

9 重构风参数的不确定度

9.1 水平风速的不确定度

应估计水平风速的不确定度。

校准（根据第 7 章）和对环境变量的敏感性（根据第 8.2 章节）提供了中间值的不确定度：沿各光束的视线风速测量以及表征激光雷达光束轨迹的量（倾角、激光雷达光轴与每个光束之间的角度、锥角等）。

测量高度水平风速的不确定度是由四个方面组合而成的（如图 7 所示）：

- a) 风场重构算法输出的不确定度-中间值的不确定度通过风场重构算法合成（见 9.2 章节）。
- b) 由于风场重构算法的适用性而产生的不确定度，如果验证了 8.3 中描述的条件，则假定为 0m/s（见 9.3 章节）。
- c) 由于测量高度的变化而产生的不确定度，要么是由于机舱的俯仰和翻滚运动，要么是地形高度变化，或者是两者兼而有之（见 9.4 章节）。
- d) 由激光雷达测量的不一致性而可能产生的额外不确定度（见 9.5 章节）。

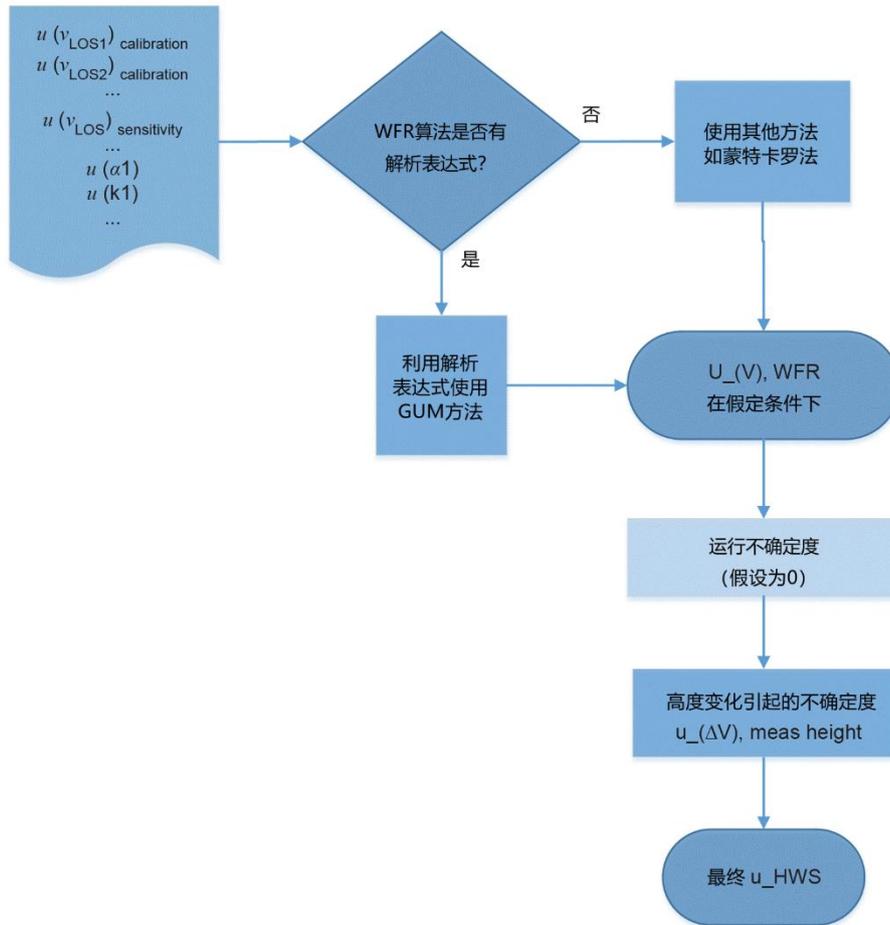


图 7 水平风速不确定性传播的高阶过程

9.2 通过风场重构算法传递的不确定度

9.2.1 中间值传递的不确定度 $u_{(V),WFR}$

中间值的不确定度(根据第 7 章和第 8 章导出)通过在特定测试中使用的重构算法传递到水平风速。

- a) 如果测量不确定度指南(见 JCGM100:2008)适用(例如可微算法),根据测量不确定度指南中的方法,使用显式方程或近似值将中间值的不确定度传递给最终变量的不确定度(见附录 A)。
- b) 如果测量不确定度指南不适用,或者算法作者没有提供方程,则应使用其他不确定度传递方法(例如蒙特卡罗方法)。在这种情况下,算法的作者/所有者应提供:
 - 1) 要么算法本身(例如可读脚本格式),要么可执行文件(DLL);
 - 2) 算法的输入量列表;
 - 3) 输出量列表。

有必要对所有输入量的不确定度进行估计。如果输入量可以校准(例如激光雷达俯仰角和翻滚角),那么应校准。如果输入量无法校准,则应提供不确定度估计(例如范围不确定度)。

在雷达的应用过程中,标定剩余误差应作为一个额外的不确定度分量。标定剩余误差根据 7.7 定义为区间平均偏差(ΔV_i)。如果视线风速根据标定结果进行了修正,剩余误差定义为通过标定函数修正的风速 $V_{LOS, i}$ 和参考风速 $V_{ref, i}$ (“i”表示标定区间的索引)之间的差值。

9.2.2 其他风场重构参数的不确定度 $u_{WFR, par}$

如果重构算法包括输入量以外的其他参数，则算法作者应指出这些参数，并估计它们的不确定度对最终值的影响。这类参数的一个例子是在算法中应用的参数，或者一个拟合方法用来优化水平风速重构，由拟合过程产生的不确定度结果应该作为一个参数处理。

9.3 与风场重构算法相关的不确定性 $u_{ope,lidar}$

应考虑由风场重构算法在不同环境变量下的性能变化产生的水平风速的测量不确定度，8.3 的目的是提供认为模型的假设是可接受的标准，这样就不需要增加更多的不确定度。如果 8.3 所述条件得到验证，则该不确定度项为空。

9.4 由测量高度的变化而产生的不确定度 $u_{(\Delta V),measHeight}$

机舱激光雷达的每束光束或视线基于以下一种或者两种机制测量地面不同高度的风：

- 风机机舱在风对风轮施加的不同推力和扭矩下会发生俯仰和翻滚，使得激光雷达光束在风轮中心轴向上向下俯仰或者翻滚。
- 激光雷达跟随风机机舱的偏航运动，如果地形不完全平坦或塔筒轻微倾斜，激光雷达光束离地面的高度发生变化。

建议对测量高度变化（见第 11.8 章节）进行修正，要么是作为风场重构算法的一部分，要么作为后处理。在任何情况下，应考虑测量高度的不确定度。

- 如果风场重构算法在特定测试所需的高度提供最终变量的输出，则不确定度估计是从中间值传递到最终值的一部分（第 9.2 章节）。
- 如果风场重构不考虑实际测量高度，但在后处理中对测量高度进行修正（见第 11.8 章节），则应估计和记录此修正的剩余不确定度。见附录 A.4 示例。
- 如果测量高度在风场重构或后处理中没有被修正，则不确定度应估计为重构水平风速可能的最大修正范围（例如：使用保守剪切指数）除以 $\sqrt{3}$ 。

9.5 由雷达测量不一致产生的不确定度

根据 11.9，如果在测量期间产生了偏差，需要增加一个不确定度项，其相应的不确定度估计应在报告中描述。

9.6 合成不确定度

上述四种（9.2.1、9.2.2、9.4、9.52）类型的不确定度可以被认为是完全不相关的，并应正交相加。

附录 A 给出了使用两光束雷达对风场重构水平风速不确定度估计的一个示例。

10 特定测量活动的准备

10.1 程序概述

特定的测量活动（例如 GB/T 18451.2-2021 功率特性测试）对机舱雷达测风的要求及其影响应在测量活动开始前准备。本章和图 8 描述了准备工作要考虑的最低要求。

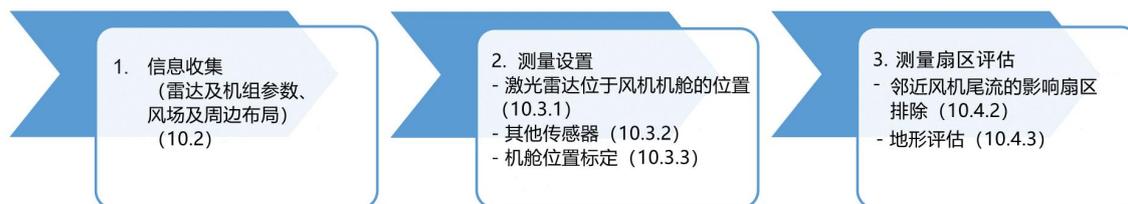


图 8 程序流程图

10.2 测量活动前的检查清单

建议在测量活动开始之前准备一份检查清单。在测量活动前能够确定的范围内，检查清单应满足第 12 章（报告格式）中要求的所有信息。

检查清单中应包含（但不限于）的最低限度信息为：

- 文件要求（根据 6.2）；
- 雷达校准报告（根据第 7 章）；
- 雷达敏感性分析报告（根据第 8 章）；
- 在风力发电机组上安装机舱雷达的相关信息（见 10.3.1）；
- 与敏感性分析报告相关的软件变更日志；
- 如需要，测量活动期间要使用的附加传感器的描述和位置（见 10.3.2）；
- 根据 10.4 的测量扇区评估（排除尾流和障碍物，地形评估）；
- 测量方法的描述（遵照 SMC 的要求）。需要特别注意激光雷达数据和风力发电机组数据的时间同步（见 11.4）。

10.3 测量设置

10.3.1 激光雷达安装

激光雷达应根据激光雷达制造商的指南进行安装。机舱上或机舱内各激光雷达部件（例如光学头和处理单元）的定位和固定应遵循 WTG 制造商的建议。

建议在安装前至少考虑以下几点：

- 应选取激光雷达与机舱上传感器相互影响最小的位置进行安装。建议确保激光雷达光学头不会干扰机舱风速计和风向标。应遵守最小距离原则，最小距离原则应与风力发电机组所有者和制造商一起定义。需考虑在测量活动期间可以对偏航对风的变化进行检查（参见 11.2 和附录 D）。
- 激光雷达测量体由机舱上的雷达光学头位置、光束轨迹、光束几何形状以及激光雷达光学头的俯仰和翻滚角度决定。需要以下输入（见附录 C）：
 - 激光雷达光学头到风轮中心的水平距离（用于水平距离参考）；
 - 激光雷达光学头距风轮中心的高度；
 - 机组运行和静止状态下，机舱俯仰和翻滚角度（由于塔架弯曲）随风速变化的函数关系。

机舱尺寸和塔架弯曲的信息可以由风机制造商提供或通过初始阶段的测量进行估计。

- 激光雷达可视轴应与风轮轴的水平投影对齐。实际中需要在机舱上定义参考线。进一步的建议和示例，请参见附录 C。

10.3.2 其他传感器

对于某些特定的测量活动（例如功率特性测试和载荷评估），需要测量空气密度。

在这种情况下，气压计和温度传感器应成为测量设置的一部分。根据 GB/T 18451.2-2021，建议使用相对湿度传感器。

仪器安装位置的选择应确保满足以下个别条件。

如果测量，应使空气温度和相对湿度传感器受能量转换过程中损耗或辐射热量的影响降至最低。为了检验这一点，可以选择在另外的位置放置作为参考的传感器。

气压传感器应确保位于与大气接触的位置。

传感器的安装应符合 GB/T 33225-2016 第 7.4 章的要求。

10.3.3 机舱位置校准

应对机舱位置（偏航角度）进行校准，并在测量活动过程中监测该校准的变化。校准应根据风力发电机组操作手册或测试仪器的操作说明和程序进行。风力发电机组的运行状态和偏航校准文件应按照 12.4 中的描述进行报告。

10.4 测量扇区

10.4.1 概述

定义合适的测量扇区应考虑障碍物位置和地形地势。

10.4.2 评估周围风力发电机组和障碍物的影响

在测量范围内，安装有激光雷达的风力发电机组和雷达视向风速不应受到邻近风力发电机组和障碍物的影响。确定显著障碍物的标准（考虑其高度及与安装激光雷达机组和距离）与 GB/T 18451.2-2021 附录 A 相同。GB/T 18451.2-2021 中定义的扇区应受到限制，以确保激光雷达光束（在轨迹/几何结构内的任何位置）始终不会受到相邻机组或障碍物尾流的影响（见图 9）。

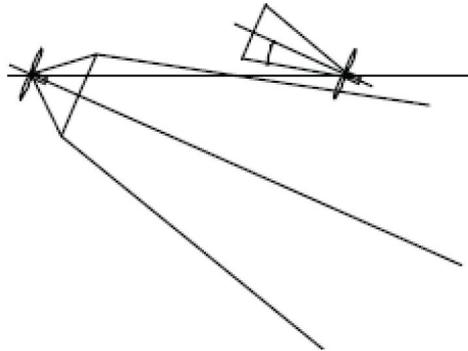


图 9 被测风力发电机组的上风向机舱雷达和邻近风力发电机组尾流的俯视示意图

障碍物应根据 GB/T 18451.2-2021 附录 A.3（表 A.1）进行评估，将 L 替换为 R_b ：

$$R_b = R_{conf} / \cos(\beta_{max}/2) \quad (23)$$

其中 R_{conf} 是测量范围， β_{max} 是光束轨迹/几何形状内任意两个光束位置之间的最大水平角（在此上下文中为全角）。

因相邻机组或障碍物尾流影响而被排除的扇区应以其到被测机组的方向为中心。扇区的大小由 β_{max} 和 θ_{wake} 之间的最大值给出，由公式 (25)，(26) 或 (27) 据情况定义（见图 10）：

如 $L_n - R_b > 2D_n$ 或 $L_e - R_b > 2D_e$ （视情况），那么：

$$\theta_{wake} = 1.3 \tan^{-1} \left(2.5 \frac{D_n}{L_n - R_b} + 0.15 \right) + 10^\circ \quad (24)$$

或者

$$\theta_{wake} = 1.3 \tan^{-1} \left(2.5 \frac{D_e}{L_e - R_b} + 0.15 \right) + 10^\circ$$

如 $L_n - R_b \leq 2D_n$ 或 $L_e - R_b \leq 2D_e$, 那么:

$$\theta_{wake} = 1.3 \tan^{-1} (1.4) + 10^\circ = 80.8^\circ \quad (25)$$

其中:

- D_n ——邻近机组的风轮直径;
- D_e ——显著障碍物的等效风轮直径;
- L_n ——到邻近机组塔架中心的距离;
- L_e ——到障碍物中心的距离。

等效风轮直径 D_e 应根据 GB/T 18451.2-2021 Annex A.4 的公式 (A.1) 进行评估。停机的风力发电机组应视为一个圆柱体, 其宽度等于塔底直径, 高度等于上叶尖高度。

图 10 图示说明了公式 (24) 至 (27)。

该公式给出的排除扇区涵盖了邻近机组或障碍物的尾流对安装机舱雷达的机组和激光雷达探测体的影响。由于机舱雷达是前视的, 雷达探测体始终处于上风向, 因此始终不会在被测机组的尾流内。

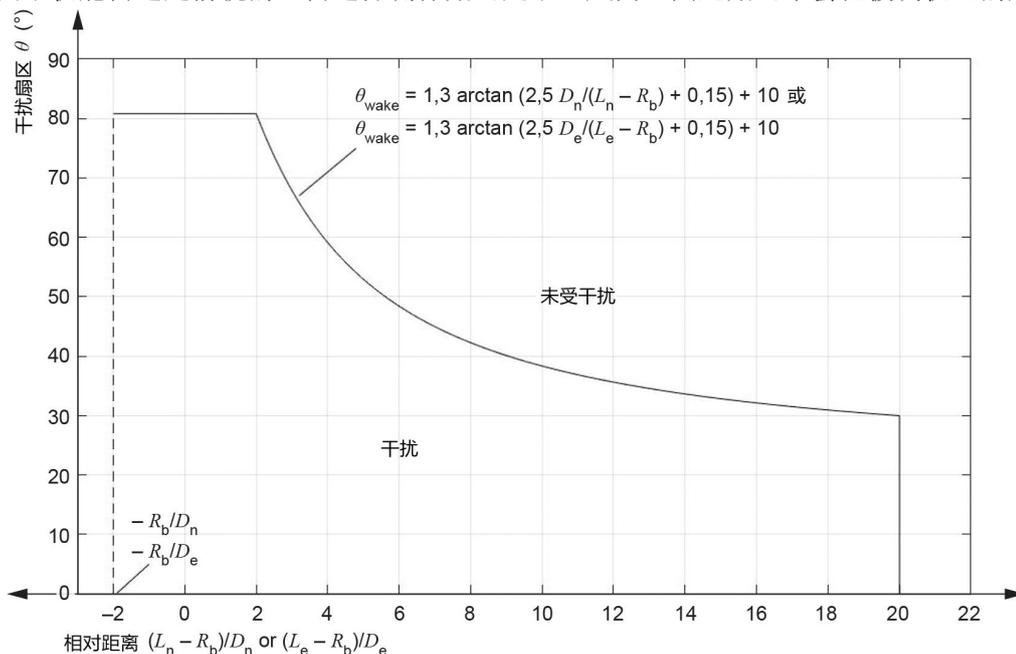


图 10 受邻近运行风力发电机组及显著障碍物尾流影响而排除的扇区

另外:

- 任何邻近运行风力发电机组与安装有机舱雷达的机组的距离应大于其风轮直径的两倍 ($L_n > 2D_n$), 同时任何显著障碍物与安装有机舱雷达的机组的距离应大于其等效风轮直径的两倍 ($L_e > 2D_e$)。
- 激光雷达测量体与相邻机组或障碍物的最小距离应为两倍风轮直径或两倍等效风轮直径(视情况而定)。应根据探测体的中心²进行评估, 如下所示:

² 注意激光雷达在探测体体积内测量。此处仅考虑探测体中心进行近似。根据 11.3 节, 测量扇区仍应通过 SMC 期间数

当 $-2D_n < L_n - R_b < 2D_n$ 或 $-2D_e < L_e - R_b < 2D_e$ 时,排除的扇区应选择 θ_{wake} 和 $\theta_{induction}$ 中较大的一个,后者按公式(28)或(29)计算。

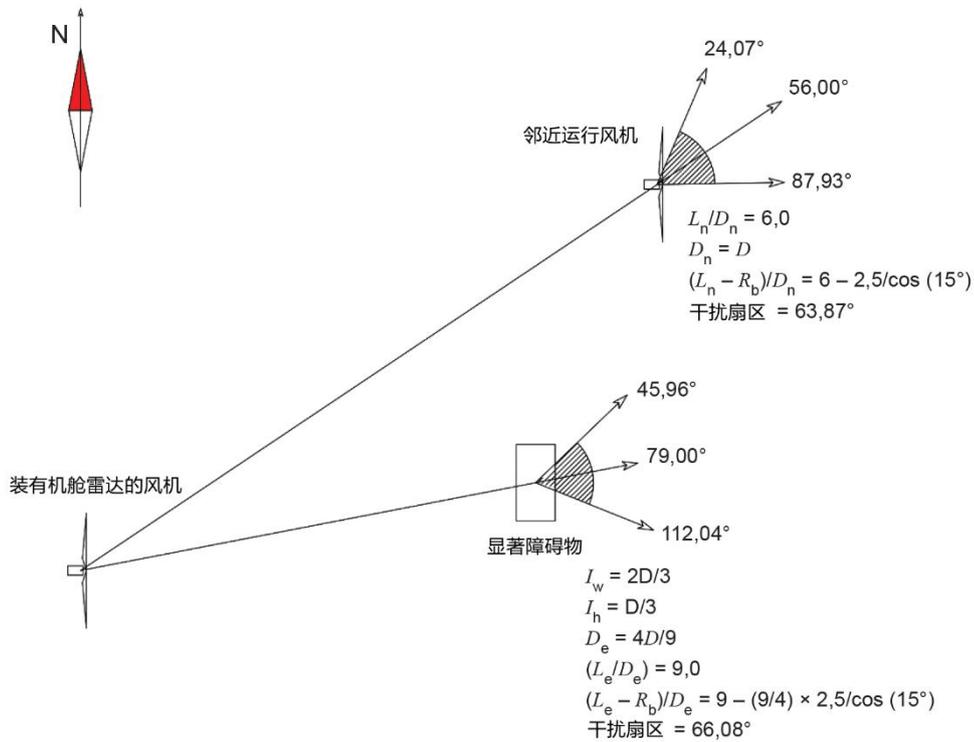
$$\theta_{induction} = \beta_{max} + 2 \cos^{-1} \left(\frac{R_b^2 + L_n^2 - (2D_n)^2}{2R_b \times L_n} \right), \text{ 或:} \tag{28}$$

$$\theta_{induction} = \beta_{max} + 2 \cos^{-1} \left(\frac{R_b^2 + L_e^2 - (2D_e)^2}{2R_b \times L_e} \right) \tag{29}$$

公式(25)至(29)基于假设安装机舱雷达的机组未出现偏航错误,或者该错误已在测量活动开始之前得到更正。

在测量扇区(11.3)的一致性检查期间,通过将激光雷达光束受到干扰的方向与邻近障碍物和机组的方向进行比较,可以实现对机组偏航对风的一致性检查。

图11中显示了一台邻近机组和另一障碍物的测量扇区计算示例。



注: 在此示例中,排除的总扇区为24.07°至112.04°

图11 邻近机组的尾流和显著障碍物的扇区排除示例

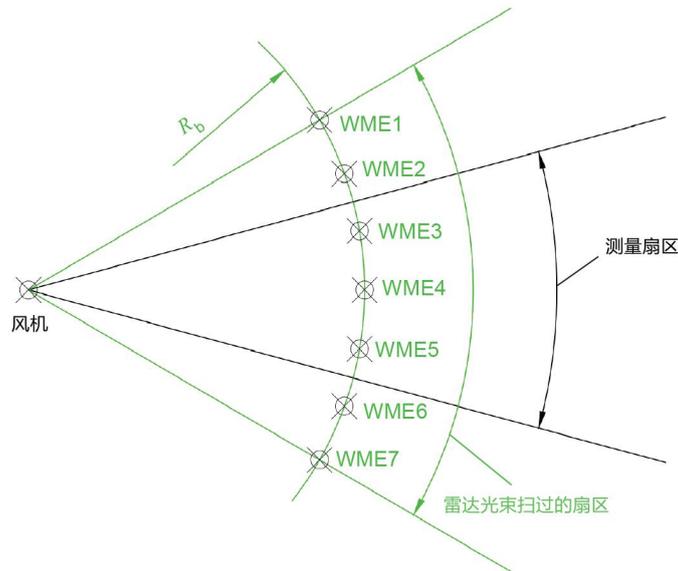
10.4.3 地形评估

地形评估应按照 GB/T 18451.2-2021 的附录 B 进行,并进行以下考虑和修正:

- 应考虑水平间隔最大的两个光束的探测体积中心位置代替测风设备。这里假设每个探测体积是一维的(即假设垂直于视线风速探测体的维度可以忽略)。
- 对于机舱式激光雷达,“被测风力发电机组与测量设备之间的距离”近似为公式(24)中所定义的 R_b 。
- GB/T 18451.2-2021 中的表 B.1 适用于评估安装激光雷达的风力发电机组周围地形以及探测体周围地形的评估。

据的一致性分析进行确认,并在必要时缩小扇区。

- 探测体始终随机舱偏航转动。因此，应针对测量扇区内的所有可能位置对探测体周围地形进行评估，如下：
 - 测量扇区内，雷达光束扫过的所有方向划分为每 10° 间隔的扇区，包括其边界；
 - 如图 12 所示，对于可能的光束方向每 10° 扇区，将雷达测量范围 R_b 代替 L 应用到 GB/T 18451.2-2021 表 B.1 中。



注：GB/T 18451.2-2021 中的表 B.1 以 WME1 至 WME7 点为中心进行评估。

图 12 扇区内全方向区间划分示例

- 对于给定的测量扇区，如果地形不符合 GB/T 18451.2-2021 中表 B.1 中对 WTG 或 WME 地形的要求，则定义为“复杂地形”。至少对于这个测试扇区，本标准不适用。但允许缩小测量扇区直到满足 GB/T 18451.2-2021 表 B.1 中的所有标准要求。
- 当测量来自测量扇区的风时（图 12 示例中从点 WME1 至 WME7 的弧线），应记录在雷达光束扫过的扇区内距离 R_b 处的地形高程剖面。如果沿此弧线的高程变化超过使用给出的限制或导致违反 WFR 的假设，则应缩小测量扇区或根据 11.8 进行修正。

11 测量程序

11.1 概述

测量程序的目标是定义一系列明确的要求，确保机舱激光雷达采集的测量数据是准确的、可重复的和可复制的。

11.2 风力发电机组运行

在测量期间，风力发电机组应按照其运行手册的规定正常运行，同时风力发电机组的配置不能更改。偏航系统应能运行，并依据 10.3.3 校准机舱位置。

整个测量期间，风力发电机组可以进行正常维护，但应在测量日志中记录。应避免任何可能影响机舱激光雷达风速测量或风力发电机组响应的维护。

需要检查机舱激光雷达的安装不会影响风力发电机组的运行性能（例如，引入偏航误差）。附录 D 描述了如何探查潜在影响的方法以及如何记录这些影响。这些方法也可用作风力发电机组偏航信号的完好性检查。

建议定期检查安装激光雷达的机舱盖的状况和俯仰值，以检测机舱盖可能出现的劣化（因为机舱盖的设计可能没有考虑激光雷达设备的负载）。

11.3 有效测量扇区的一致性检查

需要检查所有激光雷达光束/视向，在 10.4 中定义的测量扇区内没有被邻近风力发电机组或障碍物的尾迹干扰。可通过以下方式检测：

- a) 或者通过激光雷达估算的相对风向的突然变化（见图 13）；
- b) 或者通过在偏航方向上不同激光雷达光束视向方向湍流强度（定义为光束视向方向 10 分钟风速标准差和 10 分钟平均风速的比值）差的突然变化（见图 14）。

如果其中一条激光束检测到受到尾迹的干扰，则可用测量扇区应移除观察到的干扰扇区，并在干扰扇区两侧各多移除 5° 。

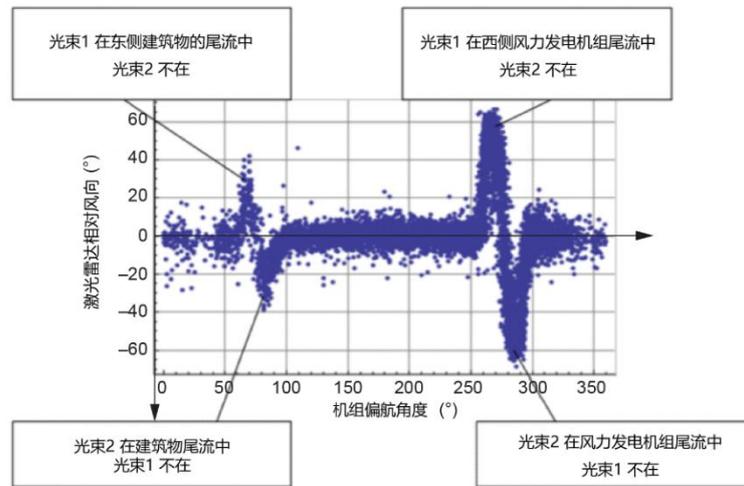
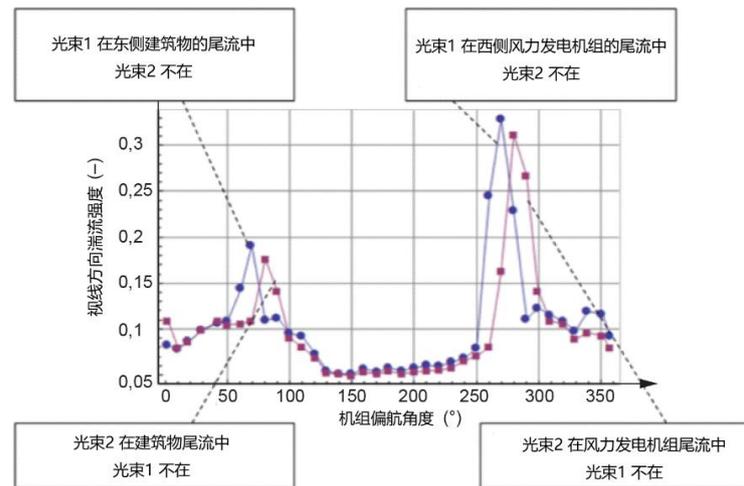


图 13 两光束激光雷达相对风向 vs 机组偏航角度 [Wagner R, 2013].



注：每个点/方块对应一个区间平均值，示例的区间宽度为 10°，当然也可应用 5° 的区间宽度。蓝色点：激光束 1；紫色方块：激光束 2 [Wagner R 2013]

图 14 两光束激光雷达光束视向方向湍流强度 VS 机组偏航角度

11.4 数据采集

数据采集应该按着激光雷达制造商的用法说明设置的采样频率持续的进行。叶片通过时，将会对有效测量值的采样频率产生影响。采样的有效性，应遵循激光雷达制造商的用法说明。应记录每条记录有多少有效的采样值。由于风轮转速会影响每条记录的有效采样数量，因此需绘制风速或风轮转速与每条记录采样数的函数。另外，建议记录有效测量点在每 10 分钟统计值上的时间分布。

机舱激光雷达数据采集系统，应该存储：

- a) 或采样数据
- b) 或有效数据和数据恢复或有效数据标识的 10 分钟统计值（平均值、标准差、最大值和最小值）。

通常，需要从不同的数据采集系统整合数据（例如，通常需要风力发电机组的风向或偏航位置信号，且可能无法直接测量获得）。在这些情况下，机舱激光雷达数据采集系统时钟应和其他数据采集系统时钟同步，且同步误差在 1%或 6s 以内（对于 10 分钟周期数据采集）。在整个测量过程中，都应该检查和维持时钟同步。

数据可能会由中间值（即光束视向方向速度）和/或最终值（即水平风速）组成。根据具体的测量活动（SMC）需要，可能需要进一步的数据需求。选定的数据集应该以 10 分钟为周期。

11.5 数据筛选

数据筛选规则应该符合具体的测量活动（SMC）要求。一般原则是，下列情况下的数据组应从数据库中剔除：

- a) 风力发电机组未处于具体测量活动（SMC）所需的运行模式；
- b) 测量设备故障或退化；
- c) 风向在 10.4 规定的测量扇区以外
- d) 激光雷达数据的可用性对于 10 分钟周期的充分表征低于某一阈值（例如，由于叶片通过或大气条件）

在上述最后一点中，可用性至少会受到测量距离、激光雷达类型和机舱激光雷达安装位置的限制。目前，还没有明确的固定的可用性值准则。相反，它将由用户定义，以确保针对具体的配置和应用有足够的可用性。

所有筛选规则都应在报告中明确说明。如果可能，应对每一个筛选器进行敏感度分析，以确定测量结果中是否存在任何影响或偏差。例如，如果一个机舱激光雷达为每一条记录提供了一个信号可用性值，则应调整用于筛选信号可用性的阈值，以确定是否使用特定的阈值对风速引入了任何偏差。

11.6 数据库

数据库要求应遵循具体的测量活动（SMC）要求（例如，GB/T 18451.2-2021 用于功率特性测量）。

11.7 风速重构算法的应用

重构算法应该应用于激光雷达光束视向方向风速的 10 分钟平均值³。

建议尽可能记录更多的机舱偏航位置信息。信息可包含 10 分钟偏航位置平均值，偏航位置的标准差和偏航电机动作⁴。

³ 在某种机舱激光雷达配置中（例如，简单双光束激光雷达），试图通过瞬时重构风速计算平均风速（标量平均），将会导致差错，因为任何扫描位置之间速度偏差会造成明显的激光雷达超速。在激光雷达激光束的扫描速度下（1/秒级），在任意湍流中，激光束的扫描位置（间隔 100 米量级的距离）之间总是存在显著的速度差。随着湍流强度的增加，由这种效应引起的误差大小将非常显著（百分之几量级）。相反，建议根据激光束视向方向 10 分钟平均风速重构水平风速。当采用更长的时间周期进行平均时，更合理的假设是，平均风速感觉是相同的，不会产生固有的超速。

⁴ 对于记录矢量平均风速的机舱激光雷达，在平均周期内恒定的偏航偏差不会影响平均风速。同样，平均偏航偏差（机组偏航与风向偏差）不影响矢量平均风速。然而，假定风速大小恒定，在平均值附近的风向波动，理论上会导致矢量平均值的低估。误差的大小取决于波动的幅度和持续时间。最坏的情况是，在平均周期一半时间内，机组风

11.8 测量高度变化

在测量过程中，需要考虑机舱激光雷达光束在地面或海平面以上的高度变化。无论地形如何，激光雷达都会随着机舱对风轮推力的回应而移动，这会导致测量高度的变化。修正高度变化可以是风速重构过程的一部分，也可应用于后处理。应记录如何量化和说明地形变化和机舱移动。

- a) 如果风电机组位置和整个测量扇区的测量位置之间存在一个恒定的高差，则应根据 10.4 在机舱激光雷达俯仰角设置中考虑高差。
- b) 如果整个测量扇区的地形高差超过用例给出的限制，则应直接在风速重构过程中或在 10 分钟平均重构风速上校正风速偏差。应记录校正方法，并根据 9.4 增加额外的不确定度项。如果在部分测量扇区满足用例的要求，可以调整测量扇区以满足测量高度要求。另见 10.4。
- c) 与地形变化类似，由于激光雷达俯仰角超过用例限制而导致的测量高度变化，应直接在风速重构过程中或重构风速上进行校正。应记录校正方法，并根据 9.4 增加额外的不确定度项。

在任何情况下，应在整个测量活动期间监测激光雷达的俯仰角，并至少在每 10° 的方向区间和每 0.5 米/秒的水平风速区间上报告记录平均值。

11.9 激光雷达测量监测

应评估和验证整个测量期间激光雷达风速测量的一致性。如果在测量期间观测到偏差，则应增加额外的不确定度项。应在报告中说明监测方法和相应的不确定度评估。作为监测的替代方法，可以对激光雷达进行后校准，并根据具体测量项目（SMC）的精度要求与预校准进行对照。

12 报告格式-专门用于机舱激光雷达的相关图表

12.1 概述

报告应符合具体测量项目（SMC）的要求（例如，对于功率特性测试，报告应符合 GB/T 18451.2-2021 第 10 章的要求）和 12.2 到 12.7 列出的机舱激光雷达具体信息条款的要求。应报告与本文件所述程序的任何偏差。

12.2 具体测量项目场地描述

- a) 风力发电机组坐标（包括参考系和基准；例如，UTM，WGS 84）；
- b) 受约束的风力发电机组和障碍物扇区坐标；
- c) 根据 10.4 选择测量扇区，并根据 11.3 验证是否免受其他风力发电机组或障碍物的影响；
- d) 近海：平均潮位和海浪高度，场地常规海平面的定义；
- e) 陆上：
 - 1) 根据 10.4.3 进行的地形评估结果；
 - 2) 地形数据库和分辨率；
 - 3) 沿半径等于 R_b 的弧线的地形高度，其中 R_b 为激光雷达的测量范围（见 10.4.3）；

12.3 机舱激光雷达信息

- a) 机舱激光雷达类型、序列号、运行软件版本；
- b) 机舱激光雷达激光束数量和扫描模式的几何描述（包括相关角度）；
- c) 安装在机舱上的激光雷达设置的所有细节，包括机舱上的位置、运行软件的配置、测量范围、

向偏差有一个阶跃变化（例如，风向变化，但机组偏航有延迟）。简单计算表明，当偏航位置在 10 分钟平均周期中间发生 10° 的阶跃变化，报告的矢量平均值比正确值低 0.4%。因此建议尽可能多地记录有关机舱偏航位置的信息。

俯仰角和翻滚角及其监测；

- d) 依据 7.8 校准报告的参考；
- e) 中间值敏感性分析结果 (8.2) 的参考，支持采用 8.4 风速重构算法可忽略不确定度贡献证据库的参考；
- f) 风杯式风速计测量的湍流强度与机舱激光雷达测量的湍流强度之间的关系；
- g) 激光雷达风速测量一致性评估结果和所用方法说明。

12.4 风力发电机组信息

除非具体测量项目 (SMC) 报告中另有规定，否则报告中应包含风力发电机组的以下信息。

- a) 品牌、型号、制造年份；
- b) 轮毂高度和用于确定轮毂高度的高度基准；
- c) 风轮直径；
- d) 风力发电机组控制 (即变桨或失速控制) 和风轮转速作为水平风速的函数；
- e) 风速推力作用下的动态倾角；
- f) 偏航信号的定义 (范围、转数、代数符号、向北偏移角度和核对方法)；
- g) 偏航信号校准报告 (见 10.3.3)；
- h) 参考时间戳的定义；
- i) 状态信号的定义；
- j) 依据 11.2 检查机舱激光雷达的安装不会影响风力发电机组的运行性能 (例如，引入偏航误差)。

12.5 数据库

- a) 测量周期；
- b) 测量期间的系统可用性；
- c) 变动日志
 - 1) 激光雷达的变动；
 - 2) 风力发电机组的变动；
 - 3) 服务/定期维护和观察。
- d) 独立数据采集系统 (例如，风力发电机组信号或 SCADA 和机舱激光雷达) 之间的同步记录文档，包括整个测量期间的同步方式和监测 (见 11.4)；
- e) 数据分析说明包括：
 - 1) 有关激光雷达采样有效性的信息 (见 11.4)：
 - (i) 用于确定采样有效性的标准；
 - (ii) 每个记录的有效采样数随风速变化的曲线图；
 - (iii) 建议记录 10 分钟统计值的有效采样时间分布情况；
 - 2) 所有筛选规则都应在报告中明确说明 (见 11.5)。应记录移除的数据集总数。可选地，也可以记录由每个筛选器移除的和通过应用筛选器累积移除的数据集的数目；
- f) 根据激光束视向方向测量的风速计算水平风速和相对风向的方法 (风速重构法) 的概述；
- g) 筛选后的环境条件 (根据 8.2 确定为不可忽略的变量)；
- h) 评估激光雷达测量一致性的监测方法描述 (11.9)。如果观察到的不一致性会导致额外的不确定性，则提供与此方法相关的不确定性计算。

12.6 绘图

- a) 随水平风速变化的激光雷达俯仰角度的散点图 (包括平均值、标准差、最小值和最大值)；
- b) 随水平风速变化的激光雷达侧倾角度的散点图 (包括平均值、标准差、最小值和最大值)；

- c) 如果相关，随水平风速变化的重构风场高度与期望测量高度之间偏差的散点图（包括平均值、标准差、最小值和最大值）。

12.7 不确定度

应报告激光雷达最终变量的详细不确定度评估（根据第9章）。见附录A中的示例。

附录 A

(资料性)

两光束激光雷达风场重构参数不确定度计算示例

A.1 示例介绍

在本附录中提出了一种基于两光束风速测量的风场重构方法激光雷达的不确定度分析,这种风场重构是固定光束几何激光雷达的典型应用,但也用于其他类型的扫描激光雷达。但在后一种情况下,还需要考虑动态定位的不确定度,此处略去。

在本例中,假定激光雷达已根据第 7 章在使用之前进行了校准,两个光束已使用相同的参考仪器(杯式风速仪用于水平风速,风向标用于风向)依次进行校准。

以下角括号表示 10 分钟时间序列的平均值,上划线表示变量的 10 分钟平均值,但该平均值不是根据高频数据计算的。两光束风场重构法计算水平风速的公式为:

$$\overline{V}_x = \frac{\langle V_L \rangle + \langle V_R \rangle}{2 \cos(\beta/2) \cos(\langle \tau \rangle)} \quad (\text{A.1})$$

$$\overline{V}_y = \frac{\langle V_L \rangle - \langle V_R \rangle}{2 \sin(\beta/2) \cos(\langle \rho \rangle)} \quad (\text{A.2})$$

水平风速 \overline{V}_{2LOS} 是按风速的纵向和横向分量的均方值计算的:

$$\overline{V}_{2LOS} = \sqrt{\overline{V}_x^2 + \overline{V}_y^2} \quad (\text{A.3})$$

相对风向 $\overline{\theta}_{2LOS}$ 是按风速的纵向和横向分量的反正切计算的:

$$\overline{\theta}_{2LOS} = \text{atan2}(\overline{V}_y; \overline{V}_x) \quad (\text{A.4})$$

变量表示的含义如下:

V_x ——纵向风速分量;

V_y ——横向风速分量;

V_L ——左边光束的视线风速,从雷达后面看;

V_R ——右边光束的视线风速;

β ——是两条光束之间的夹角;

τ ——是俯仰角度;

ρ ——是翻滚角度。

A.2 风场重构算法传递的不确定度

在 WFR 算法是可解析的和清晰的情况下,可以应用 GUM 中的方法。根据 GUM,组合不确定度的一般方程为:

$$U_c^2 = \sum_{i=1}^K \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 U_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{K-2} \sum_{j=i+1}^K r_{ij} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) U_i U_j \quad (\text{A.4})$$

$f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 为因变量 x_i 的组合函数, U_i 为它们的不确定度。这种形式允许不确定度分量之间的非零相关性, 记为 $r_{i,j}$ 。这些项在这种情况下是重要的, 因为许多左边光束的不确定度分量关联着其右边光束的相应项。

在这个例子中, 水平风速近似于风矢量的纵向分量, 而忽略横向分量, 这相当于一个零偏航误差。因此 f 的表达式为:

$$f(V_L, V_R, \beta, \tau) = \overline{V_x} = \frac{\langle V_L \rangle + \langle V_R \rangle}{2 \cos(\beta/2) \cos(\tau)} \quad (\text{A.5})$$

半开角 $\beta/2$ 和俯仰角的不确定度可以忽略, 因为它们比视线风速的不确定度低几个数量级。这个公式不包括任何具有自身不确定度的参数 ($u_{WFR, par} = 0$)。

因此, 组合不确定度只取决于沿光束的速度测量的不确定度中包含的项。不同的不确定度项被认为要么是完全相关 ($r_{i,j} = 1$), 要么是不相关 ($r_{i,j} = 0$)。此外, 相关的不确定度项被认为对所有光束来说具有相同的值, 而不相关的项可能对每个光束有不同的值。表 A.1 给出了每个不确定度项的解释。

基于这些考虑, 每个光束上的不确定性可以分解为不相关和完全相关的不确定度项:

$$u_L^2 = \sum_{i=1}^M U_{L,i}^2 + \sum_{j=1}^N C_j^2 \quad (\text{A.6})$$

和

$$u_R^2 = \sum_{i=1}^M U_{R,i}^2 + \sum_{j=1}^N C_j^2 \quad (\text{A.7})$$

其中, 不确定度分量 $U_{L,i}$ 和 $U_{R,i}$ 在视线之间不相关且不相等, 而分量 C_j 在视线之间相关且假设相等。索引 ‘L’ 和 ‘R’ 表示左边和右边的视线。请注意, 在一个光束中任何分量间都是不相关的。

重构风速 $u_{V, WFR}$ 的组合不确定度为:

$$u_{V, WFR}^2 = \left(\frac{1}{2 \cos(\beta/2) \cos(\tau)} \right)^2 \left(\sum_{i=1}^M (U_{L,i}^2 + U_{R,i}^2) + 4 \sum_{j=1}^N C_j^2 \right) \quad (\text{A.8})$$

从这个方程可以看出识别相关不确定度项的重要性, 因为它们与不相关项相比具有双重权重。因此, 将标定和中间值对环境敏感性的不确定度预算中的相关项和不相关项分别相加, 以便正确组合, 是很重要的。同样重要的是, 总和已经应用正确的影响系数, 以便所有不确定度分量缩放到视线风速。

表 A.1 不同光束之间的不确定度分量及其相关性示例

公式 (A.9) 中的符号	不确定度分量	各光束之间的不确定度相关性	释义
C_1	u_{cal} 校准不确定度	1	来自参考风杯式风速计的不确定度被假定是完全相关的，因为同一风杯式风速计已用于校准两个视线速度。
C_2	u_{ope} 运行特性	1	
C_3	u_{mast} 安装	1	
C_4	u_{daq} 数据采集	1	
C_5	u_{terr} 地形影响	1	参考仪器地形影响的不确定度被认为是完全相关的，因为两个光束都是在同一位置校准的。
$U_{L,1}; U_{R,1}$	u_{vert_pos} 高度差	0	光束高度相对于参考仪器高度的不确定度是不相关的，因为每个光束校准是特定的。
C_6	u_{inc} 测量范围	1	参考测量范围的不确定度被假定为完全相关的，因为在两个光束的校准期间，范围配置一直保持不变。
C_7	u_{θ} 参考风向传感器	1	来自参考风向标的不确定度被认为是完全相关的，因为相同的风向标已经用于两个视线速度的校准。
$U_{L,2}; U_{R,2}$	$u_{\theta_{los}}$ 视线方向的检测	0	在视线方向上的不确定度是特定于每个光束的校准—特别是这里，因为我们假设他们是依次校准，激光雷达光学头必须在两个校准的光束之间移动。
$U_{L,3}; U_{R,3}$	u_{ϕ} 投影误差	0	光束仰角的不确定度是特定于每个光束视线校准—特别是这里，因为我们假设他们是依次校准，激光雷达光学头必须在两个校准的光束之间移动。
$U_{L,4}; U_{R,4}$	$u_{residual}$ 标定产生的剩余误差	0	标定函数是由每个光束的标定单独决定的
注：如果使用了不同的校准装置(例如，如果使用两套不同的参考仪器同时校准了两个光束)，该表将会不同。			

请注意，标定产生的不确定度是视线速度的函数，它们需要转换为水平风速的函数。

A.3 激光雷达和 WFR 算法的运行不确定度

本例中的激光雷达类型假定满足 8.3 中的所有条件，以合理忽略环境对 WFR 的影响对测量不确定度的贡献 ($u_{ope,lidar} = 0$)。

A.4 来自不同测量高度的不确定度贡献

根据第 11.8 条的规定，需要考虑测量期间机舱式激光雷达光束相对于地面或者海平面的高度变化和估计其相关的不确定度。在这个例子中，WFR 算法(等式(A.1)到(A.4))未考虑测量高度的变化(即假定两个光束在同一高度独立于风机机舱俯仰或偏航变化)。因此它们的不确定度必须在后处理进行估计。

假设在任何时间光束之间没有高度差，每个 10 分钟重构水平风速 V_m 的值可以缩放到所需的测量高度(例如轮毂高度)，假设的指数切变剖面 $V_H = V_m \left(\frac{z_H}{z_m}\right)^\alpha$ 给出一个潜在的修正。

$$\Delta V_{\text{hor}} = V_H - V_m = V_m \left[\left(\frac{z_H}{z_m}\right)^\alpha - 1 \right] \quad (\text{A.9})$$

其中 z_H 为期望测量高度， z_m 为实际测量高度。如果可以，风切变指数 α 应该从测量数据中获取，否则可以假设一个常数，该常数对于地形来说是合理的，例如，对于海上应用， $\alpha = 0.1$ 。

- a) 如果水平风速没有根据高度进行修正，则不确定度应根据可能修正的最大范围进行计算。也就是在公式(A.10)中使用一个保守的切变指数：

$$u_{(\Delta V), \text{measHeight}} = \frac{\Delta V_{\text{hor}}}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.10})$$

- b) 如果水平风速根据高度进行了修正，修正的剩余不确定度可以根据 GUM 从(A.10)中相对切变、测量高度和测量风速的差值 ΔV 得到。

$$u_{(\Delta V), \text{measHeight}}^2 = \left[V_H \ln \left(\frac{z_H}{z_m}\right) u_\alpha \right]^2 + \left[V_H \frac{(-\alpha)}{z_m} u_{z_m} \right]^2 + \left[\left(\left(\frac{z_H}{z_m}\right)^\alpha - 1\right) u_{V_m} \right]^2 \quad (\text{A.11})$$

其中， u_α 为切变不确定度， u_{z_m} 为实际测量高度的不确定度， u_{V_m} 为测量风速的不确定度($u_{V_m} = u_{(V), WFR}$)。例如，在一个典型的应用中， $z_H = 100\text{m}$ ， $z_m = 98\text{m}$ ， $\alpha = 0.1$ ，和 $V_m = 10\text{m/s}$ ，测量修正后由测量高度变化产生的剩余不确定度为 $u_{(\Delta V), \text{measHeight}}^2 = \left(0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}} u_\alpha\right)^2 + \left(0.01 \frac{1}{\text{s}} u_{z_m}\right)^2 + (0.002 u_{V_m})^2$ 。

测量高度的不确定度 u_{z_m} 可以追溯到倾角测量 u_τ 的不确定度。

$$u_{z_m} = u_\tau R_{\text{conf}} / (\cos\tau)^2 \quad (\text{A.12})$$

其中， R_{conf} 为测量范围。

激光雷达光学头的翻滚运动的不确定度比俯仰运动的不确定度小几个数量级。因此，这个不确定度项可以忽略不计。

A.5 风速一致性检查

本例中，假设雷达风速测量的已经根据 11.9 进行了一致性检查，并且在测量期间没有偏差，那么就不需要增加不确定度了。

A.6 合成不确定

将各分量放在一起，本例中重构水平风速的不确定度为：

$$u_{HS}^2 = u_{(V), WFR}^2 + u_{(\Delta V), \text{measHeight}}^2 \quad (\text{A.13})$$

附录 B
(资料性)
建议的俯仰角和翻滚角测量方法

以下程序同时提供倾角仪校准和两个光束之间的张角值⁵。

图 B.1 显示了在水平面（灰色）中精确调平的两个激光雷达光束的几何形状，经过倾斜位移 τ 和滚动位移 ρ （红色）。A 点是光束的原点（在激光雷达望远镜上），B 点是光束 0 在距离 L_0 处的检测位置，C 点是光束 1 在距离 L_1 处的检测位置。两个检测到的光束位置 B 和 C 之间的距离是 L_2 。激光雷达光束的（全）张角为 β 。由于俯仰（角度 τ ）和翻滚（角度 ρ ），光束 0 和光束 1 位置分别被提升了高度 H_0 和 H_1 。

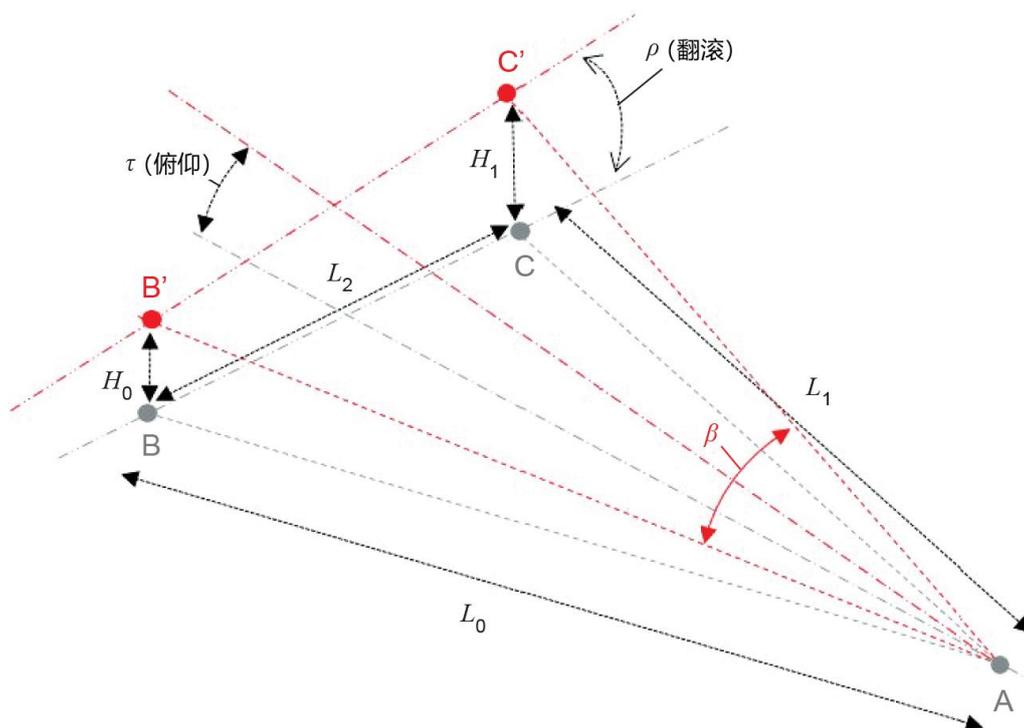


图 B.1 相对于参考位置（灰色）显示的一对俯仰和翻滚的激光雷达光束（红色）

A 点：光束原点，B 点和 C 点：光束 0 和光束 1 的探测位置。

由于预计俯仰和翻滚位移相对较小（出于实际原因）， CC' 和 BB' 近似垂直于 ABC 平面。然后，俯仰位移和翻滚位移由下式给出：

$$\tau = \operatorname{atan}\left(\frac{\frac{H_0}{L_0} + \frac{H_1}{L_1}}{2 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right) \quad (\text{B.1})$$

⁵ 对于某些类型的激光雷达，视向风速之间的夹角可以使用和倾角仪校准相同的测试和测量设置；在其他情况下，需要单独测试。

$$\rho = \operatorname{atan}\left(\frac{\frac{H_1}{L_1} - \frac{H_0}{L_0}}{2 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right) \quad (\text{B.2})$$

对于仅包含两个水平光束的激光雷达几何形状，测得的俯仰和翻滚为：

$$\tau_{\text{measured}} = \tau \quad (\text{B.3})$$

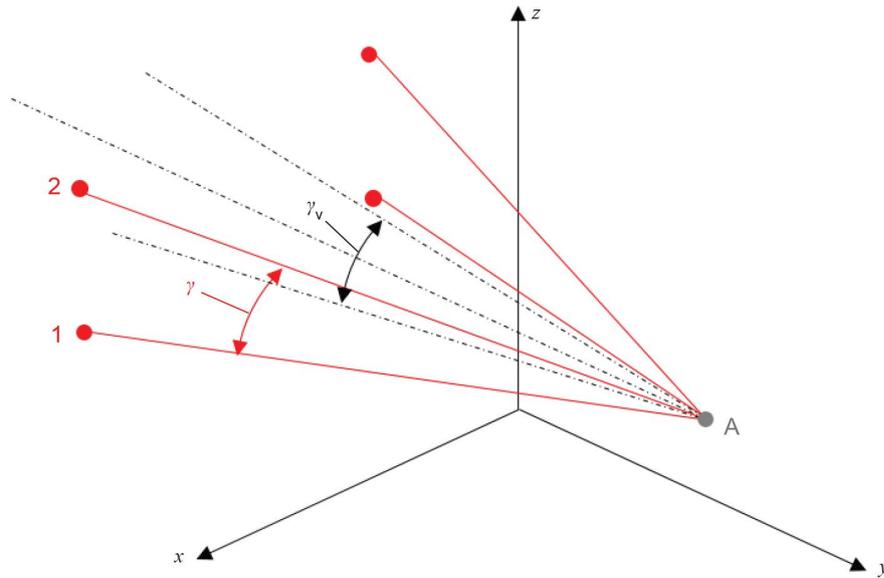
$$\rho_{\text{measured}} = \rho \quad (\text{B.4})$$

对于由两个下光束和两个上光束组成的激光雷达几何结构，具有垂直和水平对称平面，测得的俯仰和翻滚为：

$$\tau_{\text{measured}} = \tau + \gamma_v/2 \quad (\text{B.5})$$

$$\rho_{\text{measured}} = \rho \quad (\text{B.6})$$

其中 γ_v 是 γ （相对于水平面对称的两个光束之间的张角）在激光雷达的垂直对称平面上的投影，如图 B.2 所示。



注： γ_v 是 LOS 1 和 2 之间的张角 (γ) 在 YZ 平面上的投影

图 B.2 相对于水平面对称的两个光束之间的张角 (γ) 及其在激光雷达的垂直对称平面上的投影 (γ_v)

该规程还可以适用于固定几何扫描激光雷达，通过扫描模式在两个不同方位角位置进行光束探测的情况。

附录 C (资料性)

在机舱上安装激光雷达的建议

C.1 激光雷达光学头在机舱上的定位

建议在安装前考虑以下步骤，以确定激光雷达光学头和处理单元的安装位置，特别是激光雷达在机舱外部和内部具有单独的处理单元的情况下。

应根据机组上的仪器选择相关的激光雷达位置，以便将它们之间的影响降至最低。下面提供了避免此类影响的非详尽建议清单：

- 为避免激光雷达受到干扰，建议按如下方式安装激光雷达：
 - 尽可能居中以避免轨迹/几何形状左侧和右侧的光束可利用率差异；
 - 确保用于风场重构的所有激光雷达光束视向方向都没有障碍物（除了无法避免的叶片通过），参见图 C.1 和图 C.2。

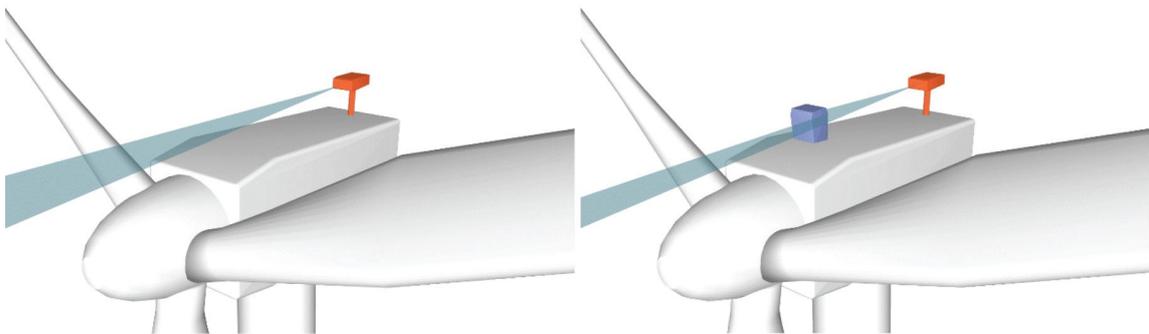


图 C.1 2 光束激光雷达的正确（左）和错误（右）位置示例图

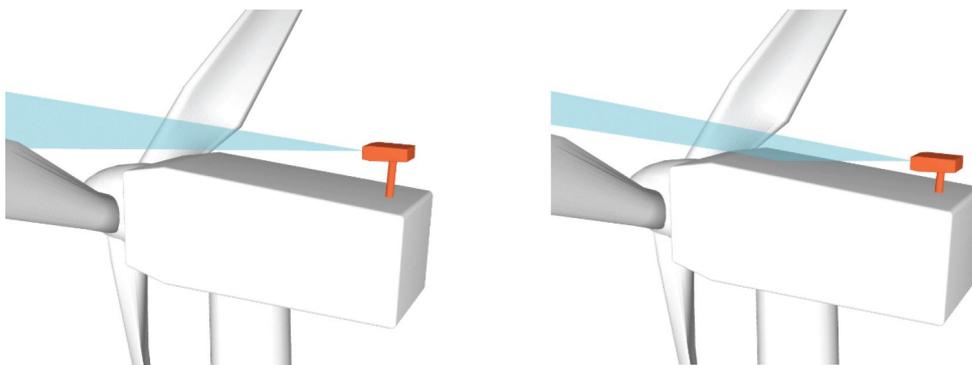


图 C.4 光束激光雷达的正确（左）和错误（右）位置示例图

- 在安装激光雷达之前，建议由原始设备制造商或独立顾问制作工作说明。如果工作说明是由独立顾问制作的，则应得到原始设备制造商或风机业主的批准。工作说明将确保：
 - 安装激光雷达的人员和进行风机维护的人员的安全；
 - 风机结构完整性；
 - 风机性能完整性（例如，激光雷达光学头不应干扰风机）。

C.2 用于固定光束激光雷达的激光雷达光学头预调

对于大多数用例，激光雷达光轴应对准风轮上游 2.5D 处的轮毂高度，这通常需要将光学头稍微向下倾斜（如图 C.3 所示）以补偿：

- 1) 光学头高于轮毂高度 (H_{OH}) :

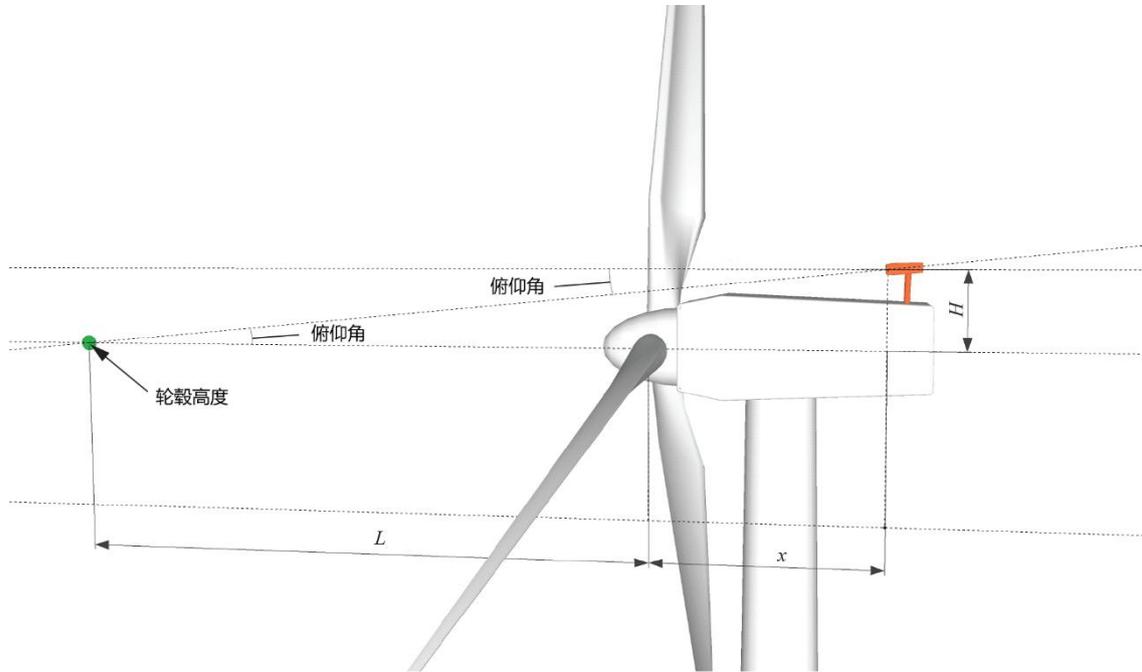


图 C.3 俯仰角向下预调以在轮毂高度测量的激光雷达光学头示意图（两光束激光雷达）

$$\delta_H = \tan^{-1} \frac{H_{OH}}{L_u + X_{OH}}$$

其中：

- 1) X_{OH} 为激光雷达光学头与风轮平面的水平距离；
 - 2) L_u 为风轮平面与上游测量位置之间的水平距离；
 - 3) H_{OH} 为激光雷达光学头与风轮轴线之间的垂直距离。
- 2) 机组运行和机组静止时机舱俯仰角度的差异（这应通过数值模拟或测量得到）：

$$\delta_{Nac} = \delta_{ope} - \delta_{standstill} ;$$

激光雷达光束向上倾斜，未对准轮毂高度。需要进一步预倾斜以解决机组运行和静止时机舱俯仰角的差异。

- 3) 在倾角仪校准中发现的偏移量： δ_{Cal}

总俯仰角预调量由下式给出：

$$\delta_{tot} = \delta_H + \delta_{Nac} + \delta_{Cal}$$

这种俯仰角预调主要与只能在一个高度进行测量并且没有配备实时机舱运动补偿的 2 光束机舱激光雷达有关。对于能够测量 2 个或更多高度的风速的机舱激光雷达（例如具有超过 2 个光束/LOS 的固定光束几何激光雷达或锥形扫描激光雷达），应该报告实际的俯仰角预调，以便计算垂直风切变校正值和所需高度出的风况。

C.3 激光雷达的锚点

定义锚定点时至少要考虑以下建议：

- 在安装激光雷达之前，应计算作用在机舱顶盖上的反作用力和动量。应根据第三方证书检查是否满足相应的安全储备系数。
- 激光雷达的锚点应放置在外壳的位置，在该位置外壳的材料特性不会因该位置本身而劣化/影响。
- 由于维修访问要求，不应将激光雷达安装在安全锚点所在的位置。

附录 D (资料性)

评估机舱安装激光雷达对机组性能的影响

D.1 概述

风机机舱上的激光雷达可能会影响测量风速和风向的传感器，这些传感器通常位于机舱的后侧。这些信号通常用于风机控制，例如偏航到主风向，因此可能存在以下情况：激光雷达影响机舱上传感器测量值，以至于风机性能受到影响。激光雷达安装的影响程度取决于使用场景。

影响的大小取决于机舱仪器和激光雷达的位置和尺寸。遵循第 10 条的放置和安装说明不应产生（或可忽略的）影响；但是，根据具体情况，建议使用下面描述的方法之一进行一致性检查以验证这一点。如有可能，应在分析中对发现的差异进行调查和纠正。差异应在测量报告中报告。

如果在激光雷达安装前后检测到显著变化，则应找到激光雷达的新位置，或者，如果这不是一个选项，则两个阶段之间的差值应被视为风速测量的不确定性。

D.2 推荐的一致性检查方法

D.2.1 概述

本文档描述了三种不同的方法，可根据可用信息和设置进行选择：

- 基于文档的方法：如果风力发电机组制造商对某个风机型号以及特定的传感器类型拥有足够的经验，则建议采用这种方法。在这种情况下，应发布一份工作说明文件来确定激光雷达的位置和安装细节。
- 基于数据的方法，风电场中风力发电机组并列排布情况：该方法使用激光雷达安装前后风力发电机组的相对性能差异来检测其对机舱仪器的影响。两个相同类型的 风力发电机组s处在相同的风力条件下，无论入流条件如何变化，相对性能应仅表现出较小的变化。除非应用基于文档的方法的经验足够丰富，否则这种方法应该是默认的方法。
- 基于数据的方法，使用激光雷达安装前后评估风力发电机组的相对功率曲线：这种方法建议用于指导书和邻近机组方法不可用的情况，例如在型式测试中。它需要考虑入流条件的变化，并收集风速和风向传感器的数据。这可能需要在机舱上安装额外的仪器。因此，只有在其他两种方法都不适用的情况下，才能使用这种方案。

D.2.2 基于文档的方法

对于特定情况（如风力发电机组机舱尺寸、风速计安装位置、激光雷达位置），相关文档（如照片和图纸）可用作证据，证明机舱仪器没有受到干扰，对风力发电机组性能没有影响。

D.2.3 使用相邻风力发电机组的基于数据的方法

D.2.3.1 概述

这种方法的总体思路是，在激光雷达安装在被测风力发电机组的机舱上之前和之后，对比测试风力发电机组和参考风力发电机组之间的各种风力发电机组参数（或替代参数）。

在激光雷达安装前后，参考和测试风力发电机组都需要以下10 分钟的SCADA信号：

- 有功功率 (kW)：平均值和最小值；
- 风力发电机组可用率信号；
- 环境温度 (°C)：平均值；
- 机舱位置 (°)：平均值—机舱位置信号应进行校准和校正（如果需要），以相对于真北的值提供；
- 机舱风速 (米/秒)：平均值；
- 机舱风向 (°)：平均值。

D.2.3.2 参考风力发电机组选择

参考风力发电机组应具有一个不受干扰的扇区，接近于测试风力发电机组的扇区。它还应在激光雷达安装前后保持相同的运行设置，并且这些设置对于参考风力发电机组和测试风力发电机组必须保持不变。只有测试风力发电机组和参考风力发电机组的未限电运行工况才会纳入分析之中。

D. 2. 3. 3 检查对风力发电机组输出功率的影响

对参考风力发电机组和安装了激光雷达的风力发电机组之间的关系（如线性回归；见图 D.1）应评估两次：

- i) 激光雷达安装前评估一次（即在无激光雷达的情况下）
- ii) 激光雷达安装后再评估一次。

参考和测试风力发电机组的合并数据集的有效点应满足以下标准：

- 共同的不受扰动扇区内的平均风向；
- 平均功率在标称功率的3%至97%范围内；
- 风力发电机组在10分钟内的可用率为100%；
- 最小功率 > 0 kW；
- 平均环境温度 > 2 °C。

图 D.1 显示了两个相邻风机之间合并有功功率数据的比较示例，其中前后关系没有明显变化。由于应用该方法的经验有限，因此本文件版本中没有提出具体标准。

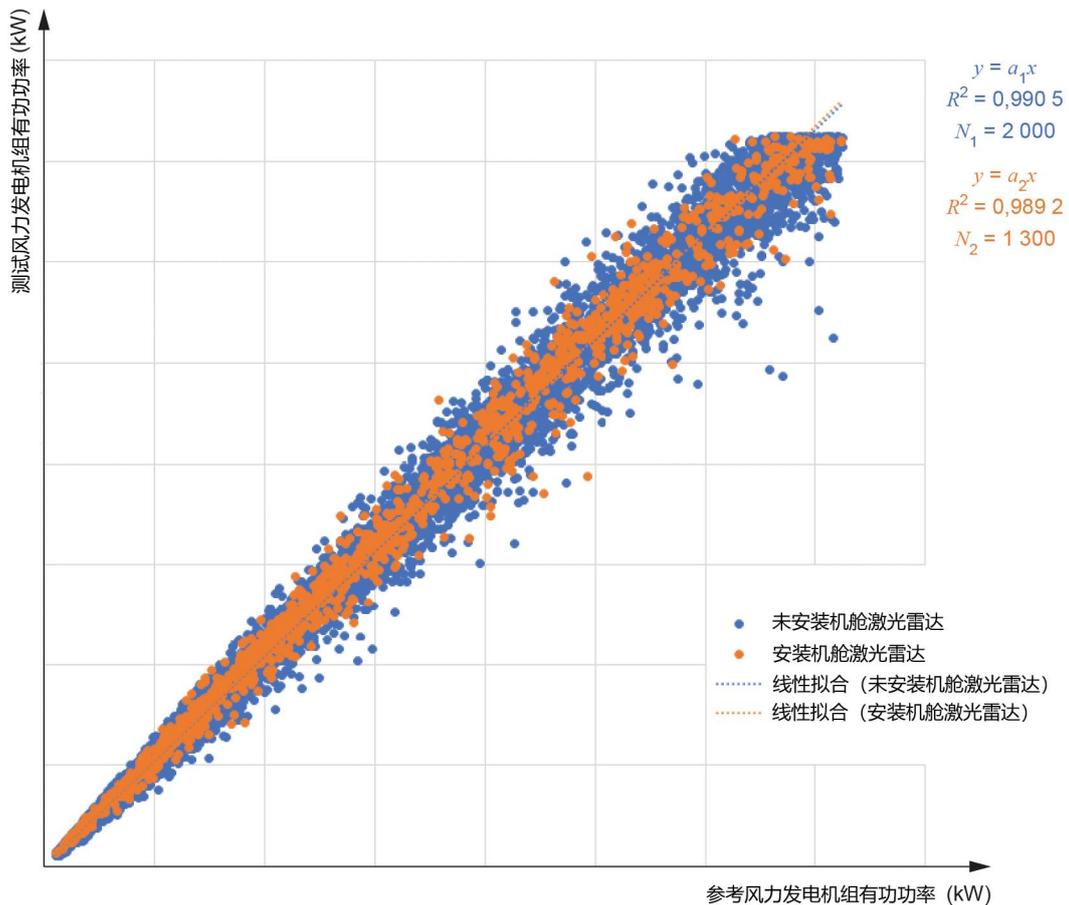


图 D.1 – 并排对比报告示例

D. 2. 3. 4 检查对风力发电机组机舱位置的影响

为了研究激光雷达安装是否影响风力发电机组偏航性能，应将两个风力发电机组的电功率比绘制为同一风力发电机组在安装激光雷达前后两个时间段的机舱位置信号的函数。图 D.2 给出了这种关系的一个例子。对于这两个时间段，分区间范围应保持不变，关注扇区的点数以及点数分布应具有可比性。

如安装激光雷达影响风机偏航性能的情况下，比率峰值的位置相对于激光雷达安装前的峰值位置发生变化。因此，如果激光雷达安装后峰值保持在相同位置，则可以得出结论，风机特性没有改变，且激光雷达不会干扰用于机组定向的传感器。峰值位置在任意方向上的1-2°的变化都在该方法的实验不确定范围内，因此不视为变化。

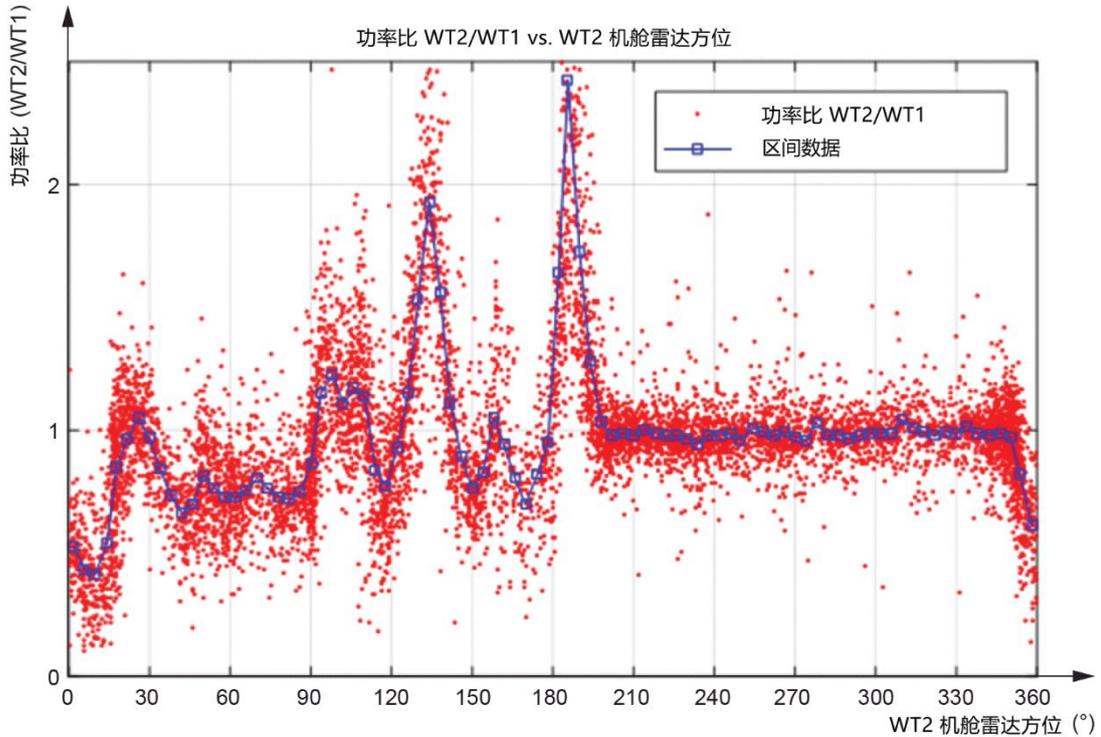


图 D.2 – 两个相邻风机之间的功率比示例

D. 2. 3. 5 检查对风力发电机组风速和风向传感器的影响

另一种确定激光雷达安装是否影响风机风速/风向传感器读数的方法是，在安装激光雷达之前和之后，检查在自由流扇区内，特定风速范围内两个风速计/风向信号的相关性，并建立与机舱位置的函数关系。如果安装的激光雷达对任何一个传感器都没有影响，则所涉及的传感器之间的关系在激光雷达安装前后将保持相似。

D. 2. 4 仅使用被评估风力发电机组的基于数据的方法

D. 2. 4. 1 概述

这种方法旨在检测，安装机舱激光雷达之前和之后，两个机舱风向传感器测量的相对风向之间的差值的显著变化。该方法如图 D.3 所示。

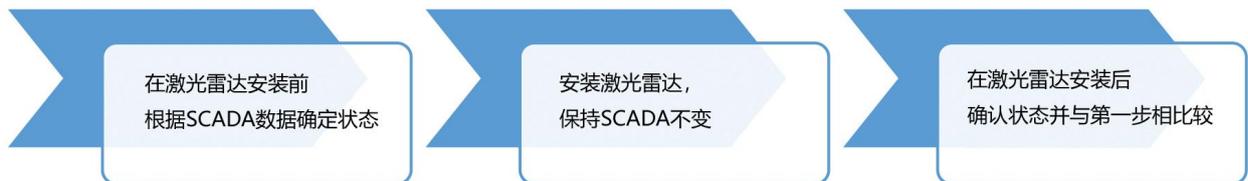


图 D.3 – 一般流程概述

这种方法基于以下假设：机舱上风向传感器输出的相对风向的变化是风机控制发生变化的单一影响因素。

D.2.4.2 所需信号

该方法需要以下风机输出的信号 – 由TR下标标示（无需进一步校正）：

- 机舱风速仪风速， $V_{Nac,TR}$ [m/s] [米/秒]；
- 主机舱风向， $Dir_{1,Nac,TR}$ [°]；
- 次机舱风向， $Dir_{2,Nac,TR}$ [°]；
- 机舱位置， $Dir_{Yaw,TR}$ [°]。

两个 $Dir_{k,Nac,TR}$ 信号认为是相对于机舱方向的风向信号。运行期间的典型幅值变化约为 ± 5 度。大多数风力发电机组设计是从两个风向传感器中选择其一，作为默认的主机舱风向 $Dir_{Nac,TR}$ 。由于该方法旨在检测系统的流向变化，因此需要两个机舱风向传感器单独信号。

安装激光雷达前后，信号处理方法必须保持不变。

由于选择的机舱位置信号样本是测量扇区内的10分钟数据，对于每个10分钟机舱位置信号样本，应对其进行校准和校正为相对于真北方向的值：

$$Dir_{TrueNorth} = (Dir_{Yaw,TR} + Dir_{OffsetCorr}) \bmod 360^\circ \quad (D.1)$$

其中， $Dir_{OffsetCorr}$ 为相对于真北校正 $Dir_{Yaw,TR}$ 的偏差角度。

建议在安装机舱式激光雷达前一个月校准机舱位置信号。由于偏航编码器可能会发生漂移，建议在安装机舱式激光雷达之前或/和之后重新检查校准的有效性。

D.2.4.3 基准

在安装激光雷达之前，需要收集基准数据集。所选数据集应满足以下要求：

- 测量扇区内的 $Dir_{TrueNorth}$ （如果对北的精度存在不确定性，建议缩小扇区）；
- 最小风速范围：6 m/s 至 10 m/s；
- 最小样本数：每 0.5m/s的区间中有 12 个样本数据（即 2 小时）。

基准是通过对所选定数据应用以下步骤获得的：

1. 对于选定数据集中的每个 10 分钟样本，评估两个机舱风向传感器之间的差值：

$$\Delta Dir_{Nac} = Dir_{1,Nac,TR} - Dir_{2,Nac,TR}$$

2. 将数据按照 0.5m/s 风速区间间隔来划分区间；

3. 对于每个区间，评估：

- 机舱风速的区间平均值， $v_{i,Nac,TR,before}$ ，
- 两个机舱风向传感器之间差异的区间平均值， $\Delta Dir_{i,Nac,before}$ ，
- 两个机舱风向传感器之间差异的区间标准偏差， $\sigma_{i,\Delta Dir,before}$ ；

4. 绘制 $Dir_{i,Nac,before}$ vs $v_{i,Nac,TR,before}$ ，with $\sigma_{i,\Delta Dir,before}$ 作为误差线（参见图 D.4 中的示例）。理想情况下， $\Delta Dir_{i,Nac,before}$ 函数应该是一个接近 0 度的常数。

D.2.4.4 激光雷达影响评估

一旦激光雷达安装完毕，SCADA数据采集系统应保持不变（即激光雷达数据不作为数据流发送到风机的控制系统）。应按照与基准相同的要求选择新数据集。 $\Delta Dir_{i,Nac,after}$ ， $\sigma_{i,\Delta Dir,after}$ 和 $v_{i,Nac,TR,after}$ 应按照与基准对应参数相同的过程进行评估。激光雷达安装前后的区间平均值和标准偏差结果绘制在一个图中（见图 D.4 中的示例）。

如果至少90%的风速区间满足以下两个条件，则认为激光雷达对机舱方向传感器没有影响：

- 激光雷达安装前后的区间平均差值 $\Delta Dir_{i,Nac}$ 相差不超过 4 度：

$$|\Delta Dir_{i,Nac,before} - \Delta Dir_{i,Nac,after}| \leq 4^\circ \quad (D.2)$$

- 激光雷达安装后的区间平均差值 $\Delta Dir_{i,Nac,after}$ 在 $\Delta Dir_{i,Nac,before} \pm \sigma_{i,\Delta Dir,before}$ 之内。在图 D.4 的示例绘图中，没有识别到系统性变化。具体细节预期会因机组设计而异。

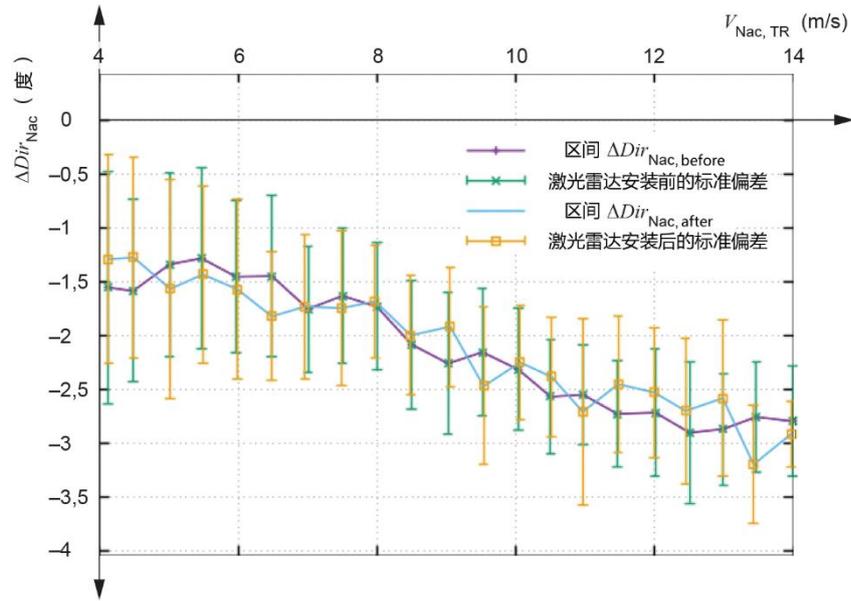


图 D.4 –分区间的 ΔDir_{Nac} 函数示例：激光雷达没有显著影响两个机舱风向传感器报告的信号

参考文献

- [1] IEC 61400-1:2019, Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements
- [2] ISO 28902-2:2017, Air quality - Environmental meteorology - Part 2: Ground-based remote sensing of wind by heterodyne pulsed Doppler lidar
- [3] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, (GUM 1995 with minor corrections), (https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf) [viewed 2020-09-15]
- [4] JCGM 101:2008, Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the GUM - Propagation of distributions using a Monte Carlo method
- [5] JCGM 200:2012, International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition), (<https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>) [viewed 2020-09-15]
- [6] IEA, task 32, CLIFTON, A. et al., IEA Wind Task 32: Wind Lidar. Identifying and Mitigating Barriers to the Adoption of Wind Lidar, Remote Sensing, Volume 10, Number 3, 2018
- [7] WAGNER R, 2013, WAGNER R, RIVERA RL, ANTONIOU I, DAVOUST S, FRIIS PEDERSENT, COURTNEY M et al. Procedure for wind turbine power performance measurement with a two-beam nacelle lidar. DTU Wind Energy, 2013. 28 p. (DTU Wind Energy E; No. 0019)
-