

团 体 标 准

T/CSEE XXXX—202X

漂浮式激光雷达系统测风规范

Specifications for floating lidar system wind measurement

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国电机工程学会 发布

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| 前 言 | 4 |
| 1 范围 | 5 |
| 2 规范性引用文件 | 5 |
| 3 术语和定义 | 5 |
| 4 技术规格要求及选型 | 6 |
| 4.1 激光雷达 | 7 |
| 4.2 浮标体 | 7 |
| 4.3 水文气象传感器 | 7 |
| 4.4 供电系统 | 7 |
| 4.5 数据传输系统 | 7 |
| 4.6 安全系统 | 7 |
| 4.7 锚泊系统 | 8 |
| 4.8 选型原则 | 8 |
| 5 漂浮式激光雷达系统性能校验 | 8 |
| 5.1 数据采集 | 8 |
| 5.2 数据筛选 | 8 |
| 5.3 性能验证 | 9 |
| 5.4 评估雷达系统测量的不确定度 | 10 |
| 6 测量程序 | 12 |
| 6.1 概述 | 13 |
| 6.2 测量前检查 | 13 |
| 6.3 数据采集 | 13 |
| 6.4 数据筛选 | 13 |
| 7 布放要求 | 13 |
| 7.1 海上运输 | 13 |
| 7.2 布放 | 13 |
| 8 运维要求 | 14 |
| 附 录 A（规范性）海上测风塔仪器安装 | 15 |
| A.1 单个顶部安装风速计 | 15 |
| A.2 顶部并排安装的风速计 | 15 |

| | |
|----------------|----|
| A.3 侧装式仪器..... | 15 |
| A.4 防雷保护..... | 17 |

华能清能院

前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准化管理办法》、《中国电机工程学会标准化管理办法实施细则》的要求，依据 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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会风力与潮汐发电专业委员会技术归口并解释。

本文件起草单位：中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、华能广东汕头海上风电有限责任公司、北京鉴衡认证中心有限公司、青岛华航环境科技有限责任公司、青岛镭测创芯科技有限公司、北京瑞科同创能源科技有限公司、南京牧镭激光科技有限公司、华能海上风电科学技术研究有限公司、江苏憬知梦蓝科技有限公司、上海中认尚科新能源技术有限公司、新疆金风科技股份有限公司、中国船舶集团海装风电股份有限公司、上海电气风电集团股份有限公司、中车山东风电有限公司、中国大唐集团华北电力试验研究院、华润电力技术研究院有限公司。

本文件主要起草人：。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条 1 号，100761，网址：<http://www.csee.org.cn>，邮箱：cseebz@csee.org.cn）。

漂浮式激光雷达系统测风规范

1 范围

本文件规定了漂浮式激光雷达系统的测风技术规格及选型、性能校验、测量流程、布放及运维要求。

本文件适用于工程前期漂浮式激光雷达对风的观测。当水深超过 20 米时，可使用漂浮式激光雷达系统进行测风；水深超过 30 米时，推荐使用漂浮式激光雷达系统进行测风。

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（包括所有的修改版本）适用于本文件。

IEC 61400-12-1:2017, Wind Energy generation systems-Part 12-1 Power performance measurements of electricity producing wind turbines

IEC 61400-1:2019, Wind turbines-Part 1: Design requirements

JCGM 200:2012, International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM)

JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement

ISO 28902-1, Air quality-Environmental meteorology-Part 1: round-based remote sensing of visual range by lidar

ISO 28902-2, Air quality-Environmental meteorology-Part 2: round-based remote sensing of wind by heterodyne pulsed Doppler lidar

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 549—2017 电焊锚链

GB 4696—2016 中国海区水上助航标志

GB/T 14914—2006 海滨观测规范

NB/T 31147—2018 风电场工程风能资源测量与评估技术规范

NB/T 31029—2019 海上风电场工程风能资源测量及海洋水文观测规范

HY/T 037—2017 海洋资料浮标作业规范

OWA Floating LiDAR Roadmap Update – Deployments of Floating LiDAR Systems

3 术语和定义

GB/T 2298、GB/T 2900.53、GB/T 20921 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

漂浮式激光雷达 Floating Lidar

一种测风设施，包括测量激光雷达、浮标体等。

3.2

测风塔 Meteorological Mast

一种测风设施，包括测量风参数设备和塔架。

3.3

数据采集器 Data Logger

用于对测量仪器测量输出信号进行采集、记录、编译、存储和传输的电子仪器。

3.4

数据完整率 Data Integrity Rate

测风期间通过观察获得的数据记录数占期望获得数据记录数的比例。

3.5

有效数据完整率 Effective Data Integrity Rate

实测数据通过检验确认的有效数据记录数占评估时段内期望获得数据记录数的比例。

3.6

测量精度 Measurement Accuracy

被测量的量值与被测量的真实量值之间的接近程度。

3.7

测量偏差 Measurement Bias

系统测量误差的估计。

3.8

测量不确定度 Measurement Uncertainty

由于测量误差的存在，对被测量值不能肯定的程度，不确定度越小，质量越高，水平越高，其使用价值越高。

3.9

湍流强度 Turbulence Intensity

在指定时间段内采集的同一组风速样本中的风速标准偏差和风速平均值的比值。

3.10

风切变 Wind Shear

风力发电机组风轮高度范围内的风速变化。

3.11

风切变指数 Wind Shear Exponent

风速随高度变化的幂指数 α ，幂方程为：

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

式中

v_h 是轮毂高度风速；

H 是轮毂高度（m）；

v_{zi} 是高度 z_i 处的风速；

α 是风切变指数。

3.12

浮标站位 buoy position

海洋资料浮标运行的地理位置，通常用 WGS84(World Geodetic System 1984) 坐标表示。

4 技术规格要求及选型

漂浮式激光雷达系统由激光雷达、浮标体、水文气象传感器、供电系统、数据采集器、数据传输系统、安全系统、锚泊系统组成。

漂浮式激光雷达系统数据完整性、有效数据完整率要求见表 1。

表 1 漂浮式激光雷达系统数据完整率及有效性要求

| | 完整率要求 | 数据有效率要求 |
|------|-------|---------|
| 每月数据 | 90% | 80% |
| 全部数据 | 95% | 85% |

4.1 激光雷达

激光雷达应至少满足以下要求：

- a) 测量范围：10~200 米；
- b) 风速分辨率：0.1m/s；
- c) 风速测量范围：0m/s~70m/s，测量精度<0.1m/s；
- d) 风向分辨率：1°。

4.2 浮标体

浮标体应满足以下要求：

- a) 浮标塔架上部配有仪器安装平台，仪器安装平台周围应加装仪器保护栏；
- b) 仪器舱和浮力舱（若有）应具有良好的密封性能；
- c) 浮标体的选型应适应布放海域的海洋环境，具备防灾害性天气（台风等）性能；
- d) 金属表面应具有防海水腐蚀及海洋生物附着的涂层。

4.3 水文气象传感器

漂浮式激光雷达系统宜预留水文测量传感器接口，包括且不限于波浪、洋流、水温、盐度等。传感器要素的观测应符合《海滨观测规范》（GB/T 14914—2006）的规定，无规定的应满足任务项目的需求，结构指标应满足浮标体的搭载需求，环境适用性应满足浮标站位海洋环境的使用要求。

4.4 供电系统

供电系统应满足以下要求：

- a) 供电能力应满足浮标所有电气设备用电需求；
- b) 供电连续性应满足任务需求；
- c) 有能源补充的供电系统，在无能源补充情况下，应提供浮标系统不小于 45 天正常供电储备；
- d) 配备蓄电池的供电系统，蓄电池更新周期应不大于 3 年。

4.5 数据传输系统

数据应采用加密方式进行传输。若采用卫星通讯传输数据，则应使用北斗卫星进行加密传输。

4.6 安全系统

安全系统应满足以下要求：

- a) 浮标顶部装有锚灯，锚灯采用橙色灯光，符合《中国海区水上助航标志》（GB 4696—2016）国家标准，在夜晚可有效提示周围过往船只注意避让，同时装有雷达反射器，能够反射船载雷达探测波，提高安全度；
- b) 浮标上装有 AIS 报警系统，可在过往船只的电子导航仪上显示自身位置，有效防止往来船只

的碰撞；

- c) 浮标内部安装有报警系统，包括位移报警、舱门打开报警以及进水报警，在发生浮标移位、舱门打开、舱内进水等紧急故障时，可以及时报警；
- d) 浮标上应装有避雷针；
- e) 浮标上应有醒目的警示标识。

4.7 锚泊系统

锚泊系统应满足以下要求：

- a) 锚链应符合《电焊锚链》(GB/T 549)的规定，缆绳应符合《渔用绳索通用技术条件》(GB/T 18674—2018)的要求，锚链和缆绳的规格尺寸应根据浮标布放海域水深及浮标系统受力情况合理选择；
- b) 不应有影响系统性能的锈蚀和损伤。

4.8 选型原则

漂浮式激光雷达系统在进行测风时，选型原则如下：

- a) 通过行业第三方认证机构分级测试，参考 IEC61400-12-1 关于地面式遥感装置分级要求；
- b) 通过行业第三方海上自立式测风塔校准测试；
- c) 仅有雷达厂家提供的出厂对比报告。

一般雷达选型应开展 b 和 c 的测试，若条件允许，宜追加 a 的测试。

5 漂浮式激光雷达系统性能校验

每次使用漂浮式激光雷达系统时，漂浮式激光雷达系统宜进行性能校验，以保证漂浮式激光雷达系统在测试期间数据有效且未发生偏移。

5.1 数据采集

5.1.1 数据采集应包括同期和同地的漂浮式激光雷达系统和参考海上测风塔测量的结果。具体要求如下：

- a) 漂浮式激光雷达系统和相关传感器比较时，应使用 10 分钟的平均间隔，记录每段间隔内测量变量的平均值、标准偏差和极值；
- b) 应记录每台仪器在每个平均间隔时间内获得平均值所对应的采集样本数量；
- c) 对设备进行准确度分级和测量分析时，应尽量减少影响漂浮式激光雷达系统和参考传感器测量之间关系的外来因素，比如结冰会影响风速计测量不准等。

5.1.2 漂浮式激光雷达系统和参考海上传感器应时间同步，时间差应在平均间隔时长的 1% 范围内，每周至少进行 1 次时间漂移的验证和测试。数据采集应满足以下要求：

- a) 参考传感器风速测量结果划分为以 0.5m/s 整数倍为中心的区间，区间宽度为 0.5m/s；
- b) 数据将根据设备制造商的建议和 5.2 的要求进行过滤。过滤后应满足以下要求：
 - 1) 标定测试的数据采集应符合：3m/s 到 16m/s 间的每个风速区间，至少记录 3 对有效的同期、同地、过滤后的数据；
 - 2) 经筛选后的数据量应至少覆盖 180 小时。

5.2 数据筛选

5.2.1 数据应通过以下要求进行筛选：

- a) 参考数据（海上测风塔和漂浮式激光雷达系统）应不受周围障碍物的尾流影响。
- b) 参考风杯风速计应不受测风塔、引线或避雷针的尾流影响。
- c) 参考风杯风速计应不受冰冻等影响，可通过任何合适的方法来去除影响，但要求记录详细方法和结果。
- d) 漂浮式激光雷达系统和参考传感器记录的每个平均时间间隔的测量值，应代表一个连续的时间段，其持续时间等于平均时间间隔。

5.2.2 应记录所有数据筛选条件及其对数据库相应的影响。

5.3 性能验证

5.3.1 漂浮式激光雷达系统测量值和参考测量值之间的偏差应与参考测量值相对标绘，以散点图表示，如图 1 所示。

- a) 对于第一个散点图，应计算相关系数。
- b) 对于第二个散点图，应计算偏差的平均值和标准偏差。
- c) 对于两个散点图，应计算因变量每个区间的平均值和标准偏差（表 2）。

5.3.2 漂浮式激光雷达系统的区间平均值应作为参考传感器测量区间平均值的函数绘制（图 2），并满足如下需求：

- a) 应通过位于参考风速范围 3m/s 至 16m/s（含）的数据点绘制双参数普通最小二乘（OLS）线性回归。
- b) 应按照图 2、表 2 中的说明，评估校准试验中的漂浮式激光雷达系统总不确定度。
- c) 应将漂浮式激光雷达系统测量值和参考测量值的区间平均偏差与校准试验的标准不确定度进行比较，该标准不确定度依据公式（2）给出的区间平均偏差减小：

$$\sqrt{u_{ver,i}^2 - (\bar{V}_{RSD,i} - \bar{V}_{Ref,i})^2} \quad (2)$$

式中：

$\bar{V}_{RSD,i}$ 在区间中校准测试的漂浮式激光雷达系统风速区间平均值，RSD 代表漂浮式激光雷达系统；

$\bar{V}_{Ref,i}$ 在区间中校准测试中参考测量的风速区间平均值；

$u_{ver,i}^2$ 根据 5.4.2 节得到校准测试中的区间中标准不确定度。

可以基于校准测试结果来校正漂浮式激光雷达系统的风速测量结果以消除偏差。如果区间内平均偏差超过上述表达式（至少在一个区间内），建议进行修正。风速校正可以由区间平均参考传感器测量值与漂浮式激光雷达系统测量值的线性回归组成。

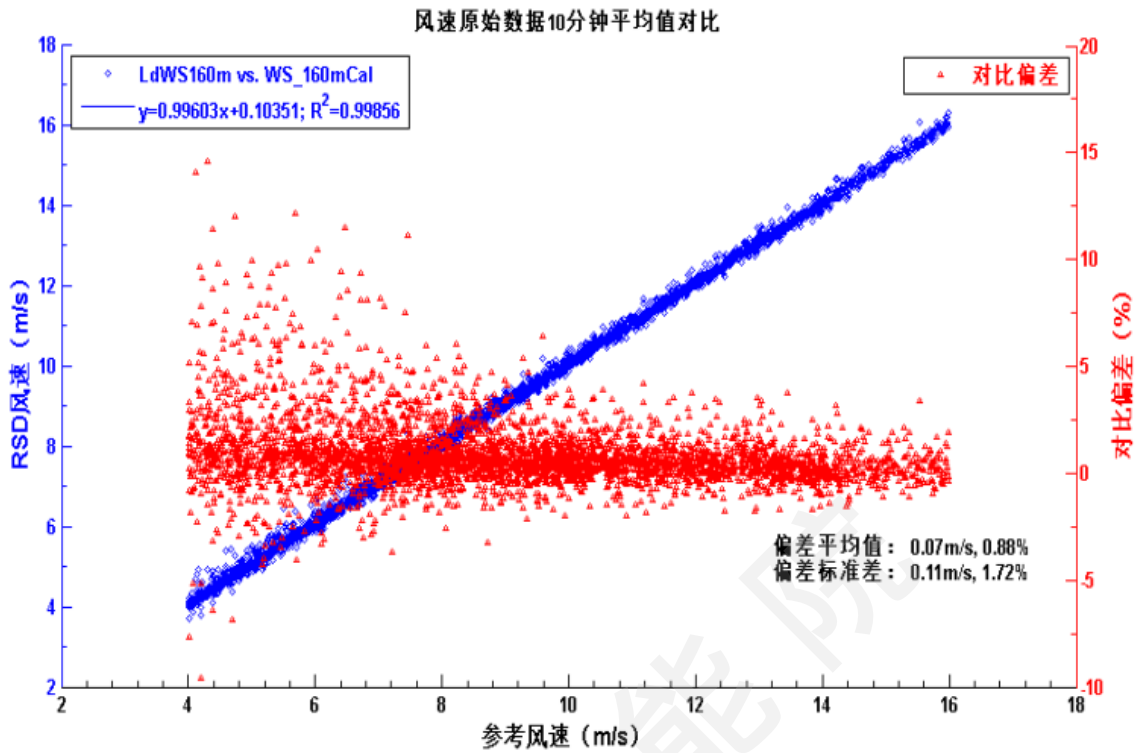


图 1 对比漂浮式激光雷达系统和杯式风速计测得的水平风速分量的 10 分钟平均值

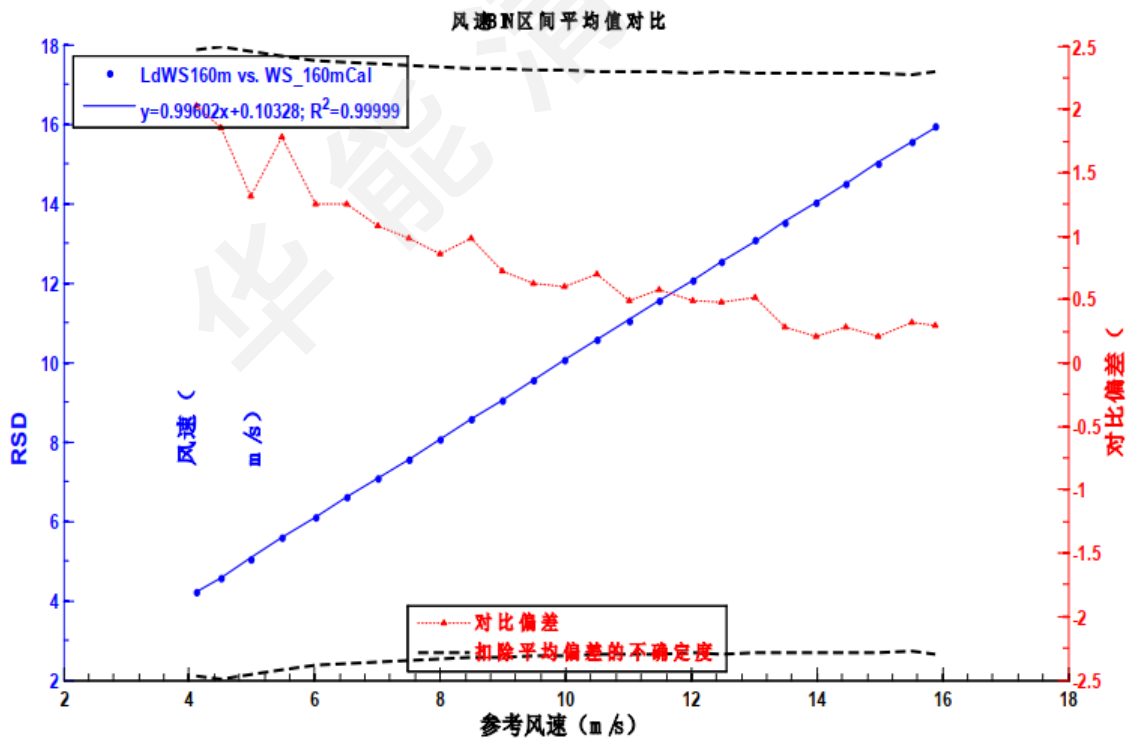


图 2 漂浮式激光雷达系统和杯式风速计水平风速测量的区间比较

5.4 评估雷达系统测量的不确定度

为评估漂浮式激光雷达系统测量的不确定度，应考虑下列内容：

- 漂浮式激光雷达系统校准试验导致的不确定度；
- 漂浮式激光雷达系统进行准确度分级所产生的不确定度；
- 漂浮式激光雷达系统测量体积内非均匀气流流动性导致的不确定度；
- 漂浮式激光雷达系统安装效应导致的不确定度。

假设不同的不确定度分量是相互独立的，应累加各个不确定度，获得最终的不确定度。

5.4.1 参考传感器不确定度

对于参考传感器的标准不确定度的评估，考虑以下不确定度分量（在杯式风速计的情况下），且认为以下分量是相互独立的，应以正交方式加入：

- 风洞标定产生的不确定度；
- 风速计运行产生的不确定度；
- 杯式风速计安装产生的不确定度；
- 任何修正参考杯式风速计测量值导致的不确定度；
- 参考仪器的数据采集系统产生的不确定度。

5.4.2 漂浮式激光雷达系统校准测试产生的不确定度

漂浮式激光雷达系统的测量结果与校准测试产生的以下系统不确定度（B类不确定度）有关，应对漂浮式激光雷达系统的每个测试区间进行计算：

- 根据 5.4.1 的参考传感器的标准不确定度；
- 漂浮式激光雷达系统测量值和参考传感器测量值的平均偏差。如果使用漂浮式激光雷达系统测量的校正公式，则评估漂浮式激光雷达系统校正的测量与参考传感器测量之间的平均偏差；
- 漂浮式激光雷达系统测量的标准不确定度，按照测量的标准偏差除以每个区间的数据记录数的平方根（校准测试的 A 类不确定度）计算；
- 由于校准测试期间的安装效应而导致的漂浮式激光雷达系统的不确定度；
- 根据 5.4.4 在校准测试期间，由于测量体积内的非均匀气流流动导致的漂浮式激光雷达系统的不确定度。

当漂浮式激光雷达系统和参考传感器测风塔之间相隔较大的距离时，则应将场地影响视为一个额外的不确定度。建议采用风速为间隔距离除以测量高度 1% 作为额外的不确定度。间隔距离是测量体积的质心与用于测试的参考传感器之间的距离。测量高度是参考传感器和漂浮式激光雷达系统之间相对的高度。

须注意的是漂浮式激光雷达系统数据采集系统的不确定度已纳入到校准测试结果中，不应另行考虑。在计算不确定度时假设不同的不确定度分量彼此独立，并为每个风速区间添加正交分量。计算示例如表 2 所示。

表 2 基于系统不确定度的漂浮式激光雷达系统校准不确定度计算示例

| V_{cup} | V_{RSD} | 数据集数量 | V_{RSD} 最大 | V_{RSD} 最小 | V_{RSD} 标准偏差 | $V_{RSD} \text{std}/\sqrt{n}$ | 平均偏差 | V_{cup} 不确定度 | 安装不确定度 RSD | V_{RSD} 不确定度 |
|-----------|-----------|-------|--------------|--------------|----------------|-------------------------------|------|----------------|------------|----------------|
| [m/s] | [m/s] | [-] | [m/s] | [m/s] | [m/s] | [m/s] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 4.133 | 4.148 | 15 | 4.30 | 4.00 | 0.090 | 0.023 | 0.4 | 2.3 | 0.5 | 2.4 |
| 4.528 | 4.525 | 33 | 4.85 | 4.28 | 0.139 | 0.024 | 0.0 | 2.2 | 0.5 | 2.3 |
| 5.064 | 5.086 | 26 | 5.31 | 4.74 | 0.141 | 0.028 | 0.4 | 2.0 | 0.5 | 2.2 |
| 5.538 | 5.593 | 47 | 5.92 | 5.28 | 0.166 | 0.024 | 1.0 | 1.9 | 0.5 | 2.2 |
| 5.985 | 6.025 | 44 | 6.27 | 5.72 | 0.141 | 0.021 | 0.7 | 1.9 | 0.5 | 2.0 |

| V_{cup} | V_{RSD} | 数据集数量 | V_{RSD} 最大 | V_{RSD} 最小 | V_{RSD} 标准偏差 | $V_{RSD} \text{std}/\sqrt{n}$ | 平均偏差 | V_{cup} 不确定度 | 安装不确定度 RSD | V_{RSD} 不确定度 |
|-----------|-----------|-------|--------------|--------------|----------------|-------------------------------|------|----------------|------------|----------------|
| 6.513 | 6.546 | 45 | 6.80 | 6.26 | 0.158 | 0.024 | 0.5 | 1.8 | 0.5 | 1.9 |
| 6.995 | 7.019 | 87 | 7.33 | 6.73 | 0.151 | 0.016 | 0.3 | 1.7 | 0.5 | 1.8 |
| 7.500 | 7.501 | 109 | 7.83 | 7.14 | 0.156 | 0.015 | 0.0 | 1.7 | 0.5 | 1.7 |
| 8.010 | 8.013 | 118 | 8.41 | 7.69 | 0.160 | 0.015 | 0.0 | 1.6 | 0.5 | 1.6 |
| 8.512 | 8.537 | 145 | 8.97 | 8.22 | 0.183 | 0.015 | 0.3 | 1.6 | 0.5 | 1.6 |
| 8.993 | 9.033 | 146 | 9.45 | 8.71 | 0.176 | 0.015 | 0.4 | 1.5 | 0.5 | 1.6 |
| 9.498 | 9.554 | 121 | 9.97 | 9.16 | 0.171 | 0.016 | 0.6 | 1.5 | 0.5 | 1.6 |
| 10.008 | 10.059 | 166 | 10.57 | 9.63 | 0.181 | 0.014 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | 1.6 |
| 10.506 | 10.536 | 106 | 10.91 | 10.25 | 0.141 | 0.014 | 0.3 | 1.5 | 0.5 | 1.5 |
| 11.003 | 11.037 | 78 | 11.52 | 10.68 | 0.185 | 0.021 | 0.3 | 1.4 | 0.5 | 1.5 |
| 11.502 | 11.510 | 59 | 11.92 | 11.13 | 0.188 | 0.025 | 0.1 | 1.4 | 0.5 | 1.4 |
| 12.000 | 12.035 | 63 | 12.62 | 11.68 | 0.217 | 0.027 | 0.3 | 1.4 | 0.5 | 1.5 |
| 12.519 | 12.521 | 68 | 12.97 | 12.15 | 0.182 | 0.022 | 0.0 | 1.4 | 0.5 | 1.4 |
| 12.957 | 12.998 | 64 | 13.40 | 12.64 | 0.186 | 0.023 | 0.3 | 1.4 | 0.5 | 1.4 |
| 13.469 | 13.470 | 40 | 13.87 | 13.17 | 0.177 | 0.028 | 0.0 | 1.4 | 0.5 | 1.4 |
| 14.011 | 14.014 | 25 | 14.36 | 13.67 | 0.192 | 0.038 | 0.0 | 1.3 | 0.5 | 1.4 |
| 14.444 | 14.490 | 30 | 14.83 | 14.21 | 0.172 | 0.031 | 0.3 | 1.3 | 0.5 | 1.4 |
| 14.983 | 14.951 | 14 | 15.48 | 14.62 | 0.246 | 0.066 | -0.2 | 1.3 | 0.5 | 1.4 |
| 15.509 | 15.585 | 17 | 15.92 | 15.38 | 0.135 | 0.033 | 0.5 | 1.3 | 0.5 | 1.4 |
| 15.990 | 16.038 | 16 | 16.24 | 15.77 | 0.130 | 0.032 | 0.3 | 1.3 | 0.5 | 1.4 |
| 16.475 | 16.479 | 10 | 16.69 | 16.22 | 0.149 | 0.047 | 0.0 | 1.3 | 0.5 | 1.3 |
| 17.066 | 17.140 | 12 | 17.50 | 16.75 | 0.227 | 0.065 | 0.4 | 1.3 | 0.5 | 1.4 |
| 17.515 | 17.682 | 13 | 17.91 | 17.44 | 0.153 | 0.042 | 1.0 | 1.3 | 0.5 | 1.6 |
| 18.001 | 18.020 | 8 | 18.32 | 17.82 | 0.157 | 0.056 | 0.1 | 1.3 | 0.5 | 1.3 |
| 18.430 | 18.549 | 13 | 18.82 | 18.25 | 0.173 | 0.048 | 0.6 | 1.3 | 0.5 | 1.5 |
| 18.849 | 18.980 | 4 | 19.16 | 18.80 | 0.149 | 0.075 | 0.7 | 1.3 | 0.5 | 1.5 |
| 19.415 | 19.430 | 3 | 19.67 | 19.23 | 0.223 | 0.129 | 0.1 | 1.3 | 0.5 | 1.4 |

注：测量体积内由于非均匀流动造成的不确定度假定为零。

漂浮式激光雷达系统测量的统计标准不确定度是由漂浮式激光雷达系统和参考传感器测量偏差的标准偏差给出的，该标准不确定度与校准试验产生的被测变量的单个 10 分钟平均值有关。

5.4.3 准确度分级不确定度

由于漂浮式激光雷达系统应用过程中的气象条件可能与校准试验过程中的气象条件不同，不同条件下漂浮式激光雷达系统的灵敏度会带来不确定度。因此标准不确定度将为最终精度等级数除以 $\sqrt{3}$ 。

5.4.4 非均匀流动引起的不确定度

漂浮式激光雷达系统假定测量体积内具有明显空间间隔的区域具有等效风条件。

5.4.5 安装不确定度

应评估由于设备的不理想水平而导致的漂浮式激光雷达系统的不确定度，评估值可参考 IEC61400-12-1。不确定度高度依赖于所用仪器的类型。

6 测量程序

6.1 概述

测量程序的目标是采集满足一系列明确定义要求的数据，测量程序应确保这些数据有足够的数量和质量，以精确确定漂浮式激光雷达系统测风的准确度。

6.2 测量前检查

测量开始前应准备一份检查列表，检查清单包含但不限于：

- a) 漂浮式激光雷达系统校准证书；
- b) 若做过分级测试认证，则需提供漂浮式激光雷达系统分级报告；
- c) 测量过程中需使用的附加传感器的证书和安装位置等；
- d) 地形及扇区评估说明，分析是否有障碍物影响等；
- e) 测试方法的描述。

6.3 数据采集

风速数据应以大于等于 1Hz 的采样频率连续采集。气温、气压、湿度以及降雨量应宜至少每分钟一次的采样频率采集。

数据采集系统应存储采样数据的以下统计值：

- a) 平均值
- b) 标准偏差
- c) 最大值
- d) 最小值

所选数据组应为 10 min 的连续测量数据，数据应采集直到满足数据样本量的要求。

6.4 数据筛选

应确保只有在漂浮式激光雷达系统正常运行下采集的数据用于分析，且数据没有被破坏。下列情况下的数据组应从数据库中剔除：

- a) 漂浮式激光雷达系统故障；
- b) 漂浮式激光雷达系统气象数据利用率低于制造商给定的数值；
- c) 其他异常情况。

7 布放要求

7.1 海上运输

漂浮式激光雷达系统布放运输应满足以下要求：

- a) 浮标拖航运输时，速度宜不大于 6 节；
- b) 浮标布放作业时，不大于三级海况。

7.2 布放

- a) 布放前应使用有效的定位设备对布放站位进行核查、确认；
- b) 布放前应对布放站位的底质和水深情况进行核查、确认；
- c) 布放前应确认结构件连接牢固，锚泊系统各连接点可靠连接；
- d) 布放浮标的锚链长度应是布放点水深的 2 至 3 倍；

- e) 浮标布放作业禁止夜间施工。

8 运维要求

为确保漂浮式激光雷达系统可正常运行，其运维要求如下：

- a) 漂浮式激光雷达系统运维人员应具有针对海上作业要求的相关证件；
- b) 浮标在经历恶劣天气后，应进行一次现场勘察，检查各传感器及浮标体状态；
- c) 漂浮式激光雷达系统回厂维修周期不得大于两年，小型浮标锚链更换时间不大于两年，大中型浮标锚链更换时间不大于三年；
- d) 浮标周期运维检修宜一年最少 4 次；
- e) 运维工作应以海况天气为前提，海况不允许的情况下，所有任务相应延后，不得危险登标。

附录 A (规范性) 海上测风塔仪器安装

A.1 单个顶部安装风速计

为使在尽可能宽的风向范围内，风速测量的气流畸变可以忽略不计，单个顶部安装的风速计是理想的配置。如果采用这种配置，则应满足本节的所有规定。尤其当海上测风塔的横截面积较大且因此导致较低位置的风速计比顶部安装的风速计受到更显著的测风塔干扰影响时，或当遇到较大的风切变时，应当仔细考虑这种配置是否能实现较低高度风速计自洽性核查的高鲁棒性。

支撑风速计的器件，应使杯式风速计至少高出海上测风塔或者其他能够引起气流扰动部件 1.5m，支撑部件或者测风塔的任何部位都不能超出以风杯顶端为顶点的 11:1 的半锥体。

风速计应安装在一个竖直圆管上，圆管尺寸与校准（和分级）时使用的圆管外径尺寸一致（ $\pm 0.1\text{mm}$ ），但不能超过风速计直径。圆管和风速计总长度（测量至风杯）不小于 0.75m。此外，为了达到风速计应该保持稳定的目的，建议使用一个直径较小的垂直圆管同心安装另一个直径较大的圆管。顶部风速计以下 1.5m 范围内的附加圆管直径不能大于风速计尺寸。连接风速计与垂直圆管的支架应当紧凑、平滑且对称。当风速计电缆线布置在支撑圆管内部时，电缆应布置在垂直管内部。对于其他配置，电缆应螺旋缠绕在垂直圆管上（大致 3 圈/m 或者与校准和分级时相似）。

风速计应当在校准时使用与现场一致的电缆附件和布线配置。风速计（和安装管）与垂直方向的偏差应小于 2° 。建议通过测量来验证。顶部风速计下方 1.5m 范围内不得有任何其他设备，且在风速计下方至少 4m 范围内也不得位于 11:1 半锥体外。在这种情况下，控制风速计应当侧面安装在距离顶部风速计至少 4m 但不超过 6m 的距离内，否则应满足 A.3 中侧面安装风速计的要求。

A.2 顶部并排安装的风速计

在两侧并排安装中，除了在此规定的条件外，还应满足 A.1 中的所有安装条件。

风速计杯应安装在横杆上方至少为横杆直径的 20 倍距离处，但推荐使用横杆直径的 25 倍距离。由水平部分和垂直杆组成的横杆应为圆形横截面。两个风速计间隔至少 2.5m 且不超过 4.0m。测风塔的任何部分都不得超出 11:1 半锥体，该半锥体的顶点与两个顶部安装的风速计的风杯之间的中点重合（顶部横杆本身不需要符合该要求，前提是它符合上述尺寸标准）。

所有其他仪器的安装位置应与风速计风杯的距离不小于 1.5m，也不能距离风速计风杯下方至少 4m 处的 11:1 半锥的外侧。建议横杆与测风塔轴线同心安装，或者在测风塔的上风侧安装。应评估一个风速计对另一个风速计的影响，并限制测量扇区，以使风速测量的总体不确定度保持在期望的限度内。应评估由其他仪器，测风塔和湍流产生的气流畸变造成的不确定度。

A.3 侧装式仪器

侧向安装的设备，例如风速计和风向传感器等受到测风塔，横杆和拉绳的气流畸变的影响。在横杆上方 20 个横杆直径的分离距离处，圆形横杆的影响为 0.5%。由横杆引起的风速计风杯位置的气流畸变应保持在 0.5% 以下。风速计应安装在圆形垂直管上，该管直径与校准（分类）期间使用的外径相同（ $\pm 0.1\text{mm}$ ），但不应大于风速计的主体直径。风向传感器应安装在与测风塔有一定距离的位置处，该距离不小于风速计推荐值的一半。从侧面安装的仪器到上面的横杆的垂直距离至少应有 20 个横杆直径。这种距离要求适用于将侧装式风速计用作另一侧装风速计在不同高度的参考风速计以及不同高度

的侧装式风速计用于风切变测量的情况。在侧装式风速计用作另一侧装式风速计的参考风速计的情况下，与主风速计的垂直间隔应在 4m 至 6m 的范围内，其中两个侧杆位于测风塔的同一侧并指向相同的方向。或者，参考风速计一侧横杆可以安装在与另一个侧安装的风速计相同的高度处，但是指向不同的方向，使得在测量扇区内两个风速计位置处的气流畸变要求得到满足。

在测风塔尾流运行的风速计受到很大的干扰。在这种条件下得到的测量结果不能用于漂浮式激光雷达系统测试校准中。测风塔上风向的气流畸变可能很大。在测风塔尾流运行中的风速计会受到很大的干扰，在漂浮式激光雷达系统测试校准中这种数据应剔除掉。测风塔上风向的气流畸变的可能性也较大，应使测风塔和风速计之间有足够的时间，从而保证测风塔的气流畸变低于 1%。A.3.1 和 A.3.2 给出了风速计和测风塔之间合适的间距的指导。

来自测风塔拉线的尾流会在相当长的距离内对风速计有较强影响。风速计安装位置应避免在拉线的下风向。

应该避免使测风塔和横杆引起的气流畸变分别大于 1% 和 0.5%。测风塔可以是圆柱形或桁架式。风速计与测风塔的时间取决于测风塔的形状和实度。

A.3.1 管状测风塔

一般情况下，测风塔气流上风向有减速，测风塔附近加速，测风塔后面有尾流，与风向差 45° 时受到的影响最小。

A.3.2 桁架测风塔

气流受测风塔影响的程度与测风塔实度、各部件的空气阻力、风向、观测点相对测风塔的距离有关。

气流畸变假定是推力系数 C_T 的函数， C_T 又取决于测风塔硬度和各个部件的空气阻力。 C_T 可视为测风塔单元长度的总阻力除上动压和支架间距 $L_m * L_m$ 。

风速计的典型距离 $R_d > 2$ 倍测风塔支架间距，测风塔方位（无论面或角迎风）引起的气流扰动非常小，因此无论测风塔方位如何，假设气流扰动是相同的。




当气流方向垂直于测风塔面时，风速计放置在与流动方向成 90° 角的位置时，可获得最小的畸变。否则，气流畸变可以通过考虑迎风偏离作为距离的函数来确定。

可以用下面的公式估算中心线风速的偏差 U_d ，它是 C_T 和 C_T/L_m 的函数：

$$U_d = 1 - (0,062C_T^2 + 0,076C_T) \cdot \left(\frac{L_m}{R_d} - 0,082 \right) \quad (A.1)$$

C_T 根据表 A.1 估算，在这个表中实度 S 为测风塔侧全部构件的投影面积与总面积的比。

表 A.1 不同桁架结构 C_T 估算方法

| 测风塔类型 | 截面 | C_T 表达式 | 可用范围 |
|-----------|---|---------------|-----------------|
| 方形截面，尖边支撑 |  | $4.4(1 - S)S$ | $0.1 < S < 0.5$ |
| 方形截面，圆支撑 |  | $2.6(1 - S)S$ | $0.1 < S < 0.3$ |
| 三角截面，圆支撑 |  | $2.1(1 - S)S$ | $0.1 < S < 0.3$ |

另外，如果给出了最大中心线风速偏差，距离 R_d 可以用下面的公式得到：

$$R_d = \frac{L}{\frac{1-U_d}{(0,062C_T^2+0,076C_T)}+0,082} \quad (\text{A.2})$$

对于桁架测风塔， C_T 为0.5，中心线风速偏差为99.5%时， R_d 应为5.7倍测风塔支架间距 L_m 。中心线风速偏差为99%时， R_d 下降为为3.7倍测风塔支架间距 L_m 。

上面的方程和图表代表了某种理想情况下的测风塔几何和流动条件。在二次支撑结构（如栅格结构，交叉支撑，缆索梯，法兰和连接支架）也出现在风速计高度水平处或接近风速计高度水平或流动方向不与测风塔横截面对称轴线平行的情况下，流动干扰将更复杂。

A.4 防雷保护

避雷针可以保护顶部安装的仪器免遭雷击。如果安装了防雷保护，需要进行以下预防工作。避雷针应该以这样的方式安装在测风塔顶部：

- a) 风速计距离避雷针的水平距离至少为避雷针直径的30倍；
- b) 当风从测量扇区吹过来时，风速计不能位于避雷针的尾流中。

如果不能满足这些条件，则需要评估风速计上的气流畸变并考虑不确定度。