# 风能发电系统 基于机舱风速计法的风力发电机组功率特性测试

## 1 范围

本标准规定了单台水平轴风力发电机组功率特性验证方法，不包括IEC 61400-2涉及的小型风力发电机组。本标准在特定运行条件或合同规定不满足IEC 61400-12-1要求的情况下使用。本标准可以用来评估特定地理位置的特定风力发电机组的性能。同样，本标准可以用来对不同类型或不同设置的风力发电机组进行常规比较。

本标准旨在提供一种统一的使用机舱风速计测试、分析、报告单个风力发电机组功率特性的方法。该标准只应用于足够大的水平轴风力发电机组，其机舱风速计对于通过风力发电机组叶片及机舱周围的气流不产生显著影响，进而不影响风力发电机组功率特性。本标准的目的是在IEC 61400-12-1提出的要求不可行的时候使用本标准提出的方法。从而保证在目前的测试技术水平和测试设备下测试结果的一致性、准确性和可重复性。

本标准规定了如何根据测试功率曲线和估计年发电量表征风力发电机组功率特性。本标准提供了测试风力发电机组功率性能相关的不确定性考虑导则。还提供了对多台风力发电机组进行测试的情况下合成不确定度评估导则。

## 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。

GB/T 20840.2 互感器 第2部分：电流互感器的补充技术要求（GB/T 20840.2-2014，IEC 61869-2:2012,MOD）

GB/T 20840.3 互感器 第3部分：电磁式电压互感器的补充技术要求（GB/T 20840.3-2013，IEC 61869-3:2011,MOD）

ISO 2533 标准大气压（Standard Atmosphere （Identical with the ICAO and WMO Standard Atmospheres from - 2 to 32 km））

ISO/IEC GUIDE 98-3 不确定度测量 第3部分：测量不确定度表达指南（GUM:1995）（Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement （GUM:1995））

注：GB/T 27418—2017 测量不确定度评定和表示（ISO/IEC Guide 98-3:2008,MOD）

ISO/IEC 17025 检测和校准实验室能力的通用要求（General requirements for the competence of testing and calibration laboratories）

注：GB/T 27025-2019 检测和校准实验室能力的通用要求（ISO/IEC 17025: 2017，IDT）

IEC 60044-1 互感器 第1部分：电流互感器（Instrument transformers - Part 1: Current transformers）

IEC 60044-2 电压互感器（Instrument transformers - Part 2: Inductive voltage transformers）

IEC 60688:2021 电子测量传感器用于将交流电气量转换为模拟或数字信号（Electrical measuring transducers for converting AC and DC electrical quantities to analogue or digital signals）

IEC 61400-12-1 风能发电系统 第12-1部分： 风力发电机组功率特性测试（Wind energy generation systems – Part 12-1: 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 61400-12-3 风能发电系统 第12-3部分：功率特性测试场地标定（Wind energy generation systems – Part 12-3: Power performance – Measurement based site calibration）

IEC 61400-12-5:2022 风能发电系统 第12-5部分：功率特性测试障碍物与地形评估（Wind energy generation systems – Part 12-5: Power performance – Assessment of obstacles and terrain）

IEC 61400-12-6 风能发电系统 第12-6部分：基于机舱传递函数功率特性测试（Wind energy generation systems – Part 12-6: Measurement based nacelle transfer function of electricity producing wind turbines）

IEC 61400-50-1 风能发电系统 第50-1部分：基于安装在测风塔、机舱和整流罩上的风杯风速仪与超声波风速仪的风测量（Wind energy generation systems – Part 50-1: Wind measurement – Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments）

## 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

**年发电量** annual energy production

*AEP*

利用测量功率曲线和轮毂高度不同风速频率分布估算得到的一台风力发电机组一年时间内生产的全部电能。计算中假设可利用率为100%。

3.3

**年发电量测量值** measured annual energy production

*AEP*-measured

利用测量功率曲线和轮毂高度不同风速频率分布估算得到的一台风力发电机组一年时间内生产的全部电能。计算中假设可利用率为100%。不含外推到更高风速下的功率曲线值

3.4

**年发电量外推值** extrapolated annual energy production

*AEP*-extrapolated

利用测量功率曲线和轮毂高度不同风速频率分布估算得到的一台风力发电机组一年时间内生产的全部电能。计算中假设可利用率为100%。包含外推到切出风速的功率曲线值。

3.5

**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。

3.6

**数据组** data set

在规定的连续时段内采集的数据集合。

3.7

**文档** documentation

任何保存在文件和/或数据中的与测试有关的信息，但可以不出现在最终报告中。

3.8

**外推功率曲线** extrapolated power curve

用估计的方法对测量功率曲线从测量的最大风速推算到切出风速而得出的功率曲线。

3.9

**气流畸变** flow distortion

由障碍物、地形变化、风力发电机组风轮、风力发电机组机舱或其它风力机引起的气流改变，其结果使测量风速相对自由流产生了严重的偏离。

3.10

**自由流风速** free stream wind speed

风力发电机组叶片上游不受风轮空气动力影响的水平风速。

3.11

**湍流强度** turbulence intensity

风速标准差与平均风速的比，在特定时间内，由相同数据组中的测量水平风速样本决定。

3.12

**轮毂高度** hub height

从塔基到风力发电机组风轮扫掠面中心的高度。

3.13

**风力发电机组配置改变** machine configuration change

风力发电机组运行时会引起风力发电机组功率特性重要变化的配置或人为干涉，不包括正常的维护。

例如：部件的替换，特别是叶片，齿轮箱或发电机，软件版本更新，非计划性叶片清洗。

3.14

**测量功率曲线** measured power curve

按确定的测量程序测试、修正和标准化处理后，风力发电机组净电功率输出与自由流风速的函数关系，用图形和表格表示。

3.15

**测量周期** measurement period

功率特性测试中收集具有统计意义的重要数据的时间段。

3.16

**测量扇区** measurement sector

测量功率曲线或确定机舱风速传递函数时所需的风向扇区。

3.17

**测量不确定度** measurement uncertainty

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。

3.18

**区间法** method of bins

将测试数据按照参数间隔分组的数据处理方法。通常用于风速区间，但也可用于其它参数。

注：在每一个区间内，记录数据集或采样的数目和总和，计算每一个区间内的平均值。

3.19

**机舱** nacelle

在水平轴风力发电机组顶部包括传动链和其它部件的壳体。

3.20

**机舱功率曲线** nacelle power curve

NPC

风力发电机组的测量功率特性表示为自由流风速与风力发电机组净有功功率的函数；对于机舱功率曲线，自由流风速不能被直接测量，而是由测量机舱风速和机舱风速传递函数得到自由流风速。

3.21

**机舱风速** nacelle wind speed

在风力发电机组机舱顶部或机舱前方测量的水平风速。

3.22

**净有功功率** net active electric power

风力发电机组传输给电网的电功率值。

3.23

**正常维护** normal maintenance

任何独立于功率特性测试的，在正常维护计划内的改变，如更换机油，清洗叶片（应独立于功率特性测试）

3.24

**障碍物** obstacle

阻挡风流动，产生气流畸变的固定物体，如建筑物和树。

3.25

**桨距角** pitch angle

在指定的叶片径向位置（通常为100%叶片半径处），叶片弦线与风轮旋转平面间的夹角。

3.26

**功率系数** power coefficient

风力发电机组净功率输出与风轮扫掠面上自由流具有的功率之比。

3.27

**功率特性** power performance

风力发电机组发电能力的度量。

3.28

**额定功率** rated power

部件、仪器和装置在特定运行条件下时测得的功率值，通常由制造商标定。

3.29

**报告** report

在最终报告中出现的任何关于测试的信息。

3.30

**粗糙长度** roughness length

假设垂直风廓线具有随高度对数变化的特性，外推至平均风速为0时的高度。

3.31

**场地标定** site calibration

通过测量在某个风向下的参考测风塔位置和风力发电机组位置的风速的相互关系来量化和潜在降低地形和障碍物影响的程序。

3.32

**标准不确定度** standard uncertainty

用标准差表示的测量结果不确定度。

3.33

**扫掠面积** swept area

对于水平轴风力发电机组，是指旋转风轮在垂直于旋转轴平面上的投影面积；对于翘翘板式风轮，指的是风轮在垂直于低速轴的平面上的投影面积。

3.34

**测试场地** test site

被测风力发电机组所在地点及环境。

3.35

**在网风力发电机组** turbine online

风力发电机组的正常工况，不包括切入切出，但包括了风轮转速在正常运行范围内发生短暂脱网的所有工况，例如发电机切换，星形/三角形或相似变换。

3.36

**风切变** wind shear

与风向垂直的平面内风速的变化。

## 4 符号和单位

| | | |
|---|---|---|
| $A$ | 风轮扫掠面积 | [$m^2$] |
| $AEP$ | 年发电量 | [Wh] |
| $AEP_m$ | 风力发电机组 $m$ 的测量年发电量 | [Wh] |
| $AEP_s$ | 年发电量的和 | [Wh] |
| ASL | 海平面以上 | [m] |
| $B$ | 大气压 | [Pa] |
| $B_{10min}$ | 测量气压的 10min 平均 | [Pa] |
| $C_p$ | 功率系数 | - |
| $C_{p,i}$ | 第 $i$ 个区间的功率系数 | - |
| $c$ | 参数的（偏微分）灵敏度系数 | - |
| $c_{B,i}$ | 第 $i$ 个区间的气压灵敏度系数 | [W/Pa] |
| $c_{d,i}$ | 第 $i$ 个区间的数据采集系统灵敏度系数 | - |
| $c_{k,i}$ | 第 $i$ 个区间的第 $k$ 个分量的灵敏度系数 | - |
| $c_{l,j}$ | 第 $j$ 个区间的第 $l$ 个分量的灵敏度系数 | - |
| $c_{M,i}$ | 第 $i$ 个区间的空气密度校正灵敏度系数 | [$W/m^3kg$] |
| $c_{m,k,i}$ | 风力发电机组 $m$ 第 $i$ 个区间的第 $k$ 个分量的灵敏度系数 | - |
| $c_{n,l,i}$ | 风力发电机组 $n$ 第 $j$ 个区间的第 $l$ 个分量的灵敏度系数 | - |
| $c_{T,i}$ | 第 $i$ 个区间的气温灵敏度系数 | [W/K] |
| $c_{V,i}$ | 第 $i$ 个区间的风速灵敏度系数 | [$W/ms^{-1}$] |
| $F(V)$ | 风速的瑞利累积概率分布函数 | - |
| $f_i$ | 第 $i$ 个区间的风速在 $V_{i-1}$ 与 $V_i$ 时瑞利累积概率 | - |
| $NT$ | 风力发电机组的数量 | - |
| $L$ | 被测风力发电机组的数量 | - |
| $l_X$ | 与源 X 相关的贡献因子 | - |
| $M$ | 每个区间内的不确定度分量个数 | - |
| $M_A$ | A 类不确定度分量个数 | - |
| $M_B$ | B 类不确定度分量个数 | - |
| $N$ | 区间个数 | - |
| $N_h$ | 一年的小时数，约 8760 小时 | - |
| $N_i$ | 风速区间 $i$ 内 10min 数据组个数 | - |
| $N_m$ | 风力发电机组 $m$ 的区间个数 | - |
| $N_n$ | 风力发电机组 $n$ 的区间个数 | - |

| | | |
|---|---|---|
| $N$ | 采样间隔内的采样数 | - |
| NPC | 机舱功率曲线 | - |
| NTF | 机舱风速传递函数 | - |
| $P_i$ | 第 $i$ 个区间的标准化平均功率 | [W] |
| $P_n$ | 标准化功率 | [W] |
| $P_{n,i,j}$ | 第 $i$ 个区间内数据组 $j$ 的标准化功率输出 | [W] |
| $P_{10min}$ | 测量功率的 10min 平均值 | [W] |
| $P_w$ | 水蒸汽压力 | [Pa] |
| $R_0$ | 干燥空气气体常数（287.05） | [J/(kg.K)] |
| $R_W$ | 水蒸气气体常数（461.5） | [J/(kg.K)] |
| $s_{NTF}$ | 源于机舱传递函数的 A 类不确定度分量 | - |
| $s$ | A 类不确定度分量 | [W] |
| $s_{AEP,k}$ | 年发电量 A 类不确定度分量 $k$ | [W] |
| $s_{AEP,m,k}$ | 风力发电机组 $m$ 年发电量 A 类不确定度分量 $k$ | [W] |
| $s_{k,i}$ | 第 $i$ 个区间内分量 $k$ 的 A 类标准不确定度 | [W] |
| $s_i$ | 第 $i$ 个区间内合成标准不确定度 | [W] |
| $s_{P,i}$ | 第 $i$ 个区间内功率的 A 类标准不确定度 | [W] |
| $se_{AEP}$ | 样例中平均年发电量的标准误差 | [Wh] |
| $slope_i$ | 相邻高程点间的倾角 | [K] |
| $T$ | 绝对温度 | [K] |
| $T_{10min}$ | 测量绝对气温 10min 平均值 | [K] |
| $u$ | B 类不确定度分量 | - |
| $u_{dB,i}$ | 测试系统中气压 B 类不确定度分量 | - |
| $u_{AEP}$ | 年发电量估计的合成标准不确定度 | [Wh] |
| $u_{AEP,ratio}$ | 年发电量不确定度的比 | - |
| $u_{AEP,AVG}$ | 平均年发电量的不确定度 | [Wh] |
| $u_{AEP,i}$ | $i$ 机组年发电不确定度 | [Wh] |
| $u_{AEP,k}$ | 年发电量中 B 类不确定度分量 k | [Wh] |
| $u_{AEP,m,k}$ | 风力发电机组 m 年发电量的 B 类不确定度分量 k | [Wh] |
| $u_{B,i}$ | 第 $i$ 个区间内气压的 B 类 标准不确定度 | [W] |
| $u_{c,i}$ | 第 $i$ 个区间内功率的合成标准不确定度 | [W] |
| $u_{FS}$ | 自由流风速的不确定度分量 | [W] |
| $u_i$ | 第 $i$ 个区间内的 B 类合成标准不确定度 | - |

| | | |
|---|---|---|
| $u_{k,i}$ | 第 $i$ 个区间内分量 $k$ 的 B 类不确定度 | [W] |
| $u_{m,k,i}$ | 风力发电机组 $m$ 第 $i$ 个区间内分量 $k$ 的 B 类不确定度 | [W][kg/m$^3$] |
| $u_{l,j}$ | 第 $j$ 个区间内分量 $l$ 的标准不确定度 | [W] |
| $u_{m,i}$ | 第 $i$ 个区间内空气密度校正的 B 类标准不确定度 | [kg/m$^3$] |
| $u_{n,l,j}$ | 风力发电机组 $n$ 第 $j$ 个区间分量 $l$ 的标准不确定度 | - |
| $u_{P,\mathrm{i}}$ | 第 $i$ 个区间内功率的 B 类不确定度 | [W] |
| $\mathrm{u}_{PARK,\mathrm{AEP}}$ | 风电场年发电量评估合成不确定度 | [Wh] |
| $u_{sc,i,j}$ | 风速第 $i$ 个区间和风向第 $j$ 个区间内场地标定的不确定度分量 | [W] |
| $u_{V,i}$ | 第 $i$ 个区间内风速的 B 类不确定度 | [W] |
| $u_{V,k,i}$ | 第 $i$ 个区间风速 k 分量的标准不确定度 | - |
| $u_{WD}$ | 风向不确定度 | - |
| $u_{dWD}$ | 数据采集中风向不确定度 | [°] |
| $u_{\mathrm{WD,SENSOR}}$ | 风向不确定度，在机舱上测得 | [°] |
| $u_{\mathrm{WD,YAW}}$ | 风向不确定度，偏航分量 | [°] |
| $u_{\mathrm{T},i}$ | 第 $i$ 区间温度标准 B 类不确定度 | [K] |
| $V$ | 风速 | [m/s] |
| $V_{\mathrm{ave}}$ | 轮毂高度的年平均风速 | [m/s] |
| $V_{\mathrm{free}}$ | 由机舱风速传递函数修正后的测量机舱风速 | [m/s] |
| $V_i$ | 第 $i$ 个区间标准化平均风速 | [m/s] |
| $V_n$ | 标准化风速 | [m/s] |
| $V_{n,i,j}$ | 第 $i$ 个区间内数据组 $j$ 的标准化风速 | [m/s] |
| WTG | 风力发电机组 | - |
| $X$ | 机组的规模，通常是风电场的风电机组数量 | - |
| $\rho$ | 相关系数 | - |
| $\rho_{k,l,i,j}$ | 第 $i$ 个区间第 $k$ 个分量不确定度与第 $j$ 个区间第 $l$ 个分量不确定度的相关系数 | - |
| $\rho_{k,m,n}$ | 风力发电机组 $m$ 和风力发电机组 $n$ 的第 $k$ 个分量的相关系数 | - |
| $\rho_{m,n,k,l,i,j}$ | 风力发电机组 $m$ 第 $i$ 个区间第 $k$ 个分量和风力发电机组 $n$ 第 $j$ 个区间第 $l$ 个分量的相关系数 | - |
| $\rho_0$ | 参考空气密度 | [kg/m$^3$] |
| $\rho_{10\mathrm{min}}$ | 空气密度的 10min 平均值 | [kg/m$^3$] |
| $\rho_{ubi,m,n}$ | 气压相关系数 | - |

| | | |
|---|---|---|
| $\rho_{umi,m,n}$ | 方法的相关系数 | - |
| $\rho_{upi,m,n}$ | 电功率的相关系数 | - |
| $\rho_{sp,m,n}$ | 统计相关系数 | - |
| $\rho_{uti,m,n}$ | 温度相关系数 | - |
| $\rho_{uvi,m,n}$ | 风速相关系数 | - |
| $\sigma$ | 标准差 | - |
| $\sigma_{P,i}$ | 第 $i$ 个区间内标准化功率数据的标准差 | [W] |
| $\phi$ | 相对湿度（范围从 0 到 1） | - |

## 5 测试方法概述

本“机舱风速计”功率曲线测试方法在数据获取以表征风力发电机组的功率曲线方面与IEC 61400-12-1相似功率是自由流风速的函数。两种方法中，如果风力发电机组不阻碍风速，自由流风速都是位于风力发电机组风轮中心位置处的自由流风速的水平分量。在IEC 61400-12-1中，风速计放置于距风力发电机组2倍～4倍风轮直径距离的测风塔上。在平坦地形下，这个位置提供了风力发电机组安装前合理的评估风力发电机组位置处风速的方法。在复杂地形情况下，通过场地标定对测风塔与风力发电机组风轮中心位置的风速畸变进行修正。

在本机舱风速计方法中，风速由装在机舱顶部或前部的风速计测量。这个位置与风力发电机组风轮中心相对较近，所以在理想测量位置和实际测量位置之间又周围地形和障碍物引起的风畸变较小。然而，风轮和机舱使风严重畸变。因此需要量化这种畸变并在测试程序中予以考虑。本方法通过机舱风速传递函数（NTF）描述了这一畸变，机舱风速传递函数（NTF）由IEC 61400-12-6所述的试验方法以及定义标准来判断对于目标风力发电机组传递函数是否有效。

一旦获得传递函数，用机舱风速计建立机舱功率曲线（NPC）的方法与IEC 61400-12-1的方法是相似的。本标准中，这部分方法叫做“特性测试”。与IEC 61400-12-1类似要求的数据包括：风速（由机舱风速而不是测风塔风速得到）、风向（通过机舱偏航位置和风向标而不是利用测风塔风向标得到）、电功率、温度、气压及其它条件。运用与场地标定相似的修正方法将传递函数应用于测量的风速。有效数据按区间分组，机舱功率曲线由图表表现。确定年发电量和测量不确定度并写入报告。

在运用本标准所描述的方法时，下面几点应该特别注意。功率曲线结果的定义与IEC 61400-12-1不同，因为传递函数只能在风轮从风中获取功率时建立并应用。导致，本标准确定的功率曲线没有考虑风力发电机组不在网的工况（启机、内部检查时的待机、磁滞效应等）。在这方面，功率曲线与IEC 61400-12-1中数据库B的功率曲线类似，但不完全相同。在极端工况下，根据本方法得到的功率曲线确定的平均功率输出可能偏大，且与IEC 61400-12-1相比，年发电量会被高估。

此外，这个方法基于地形影响可以从风轮影响中分离出来的假设，即地形影响可以通过场地标定获得，而风轮影响可以通过传递函数获得。IEC 61400-12-1也有地形影响可以通过场地标定获得这个假

设。然而，这个假设的有效性对本标准方法有很强的影响。基于此，需要额外考虑由地形引起的不确定度。最后，这个方法基于传递函数和功率曲线不受季节影响的假设。有足够的证据去怀疑这一假设。因此，不确定度评估反映了季节依赖性。标准的使用者在实际应用这一标准时应该清楚这一点。

注意场地标定与机舱功率曲线的测试无关。然而，可能需要场地标定确定机舱风速传递函数（NTF）。

机舱功率曲线测试方法的简要流程如图1所示。

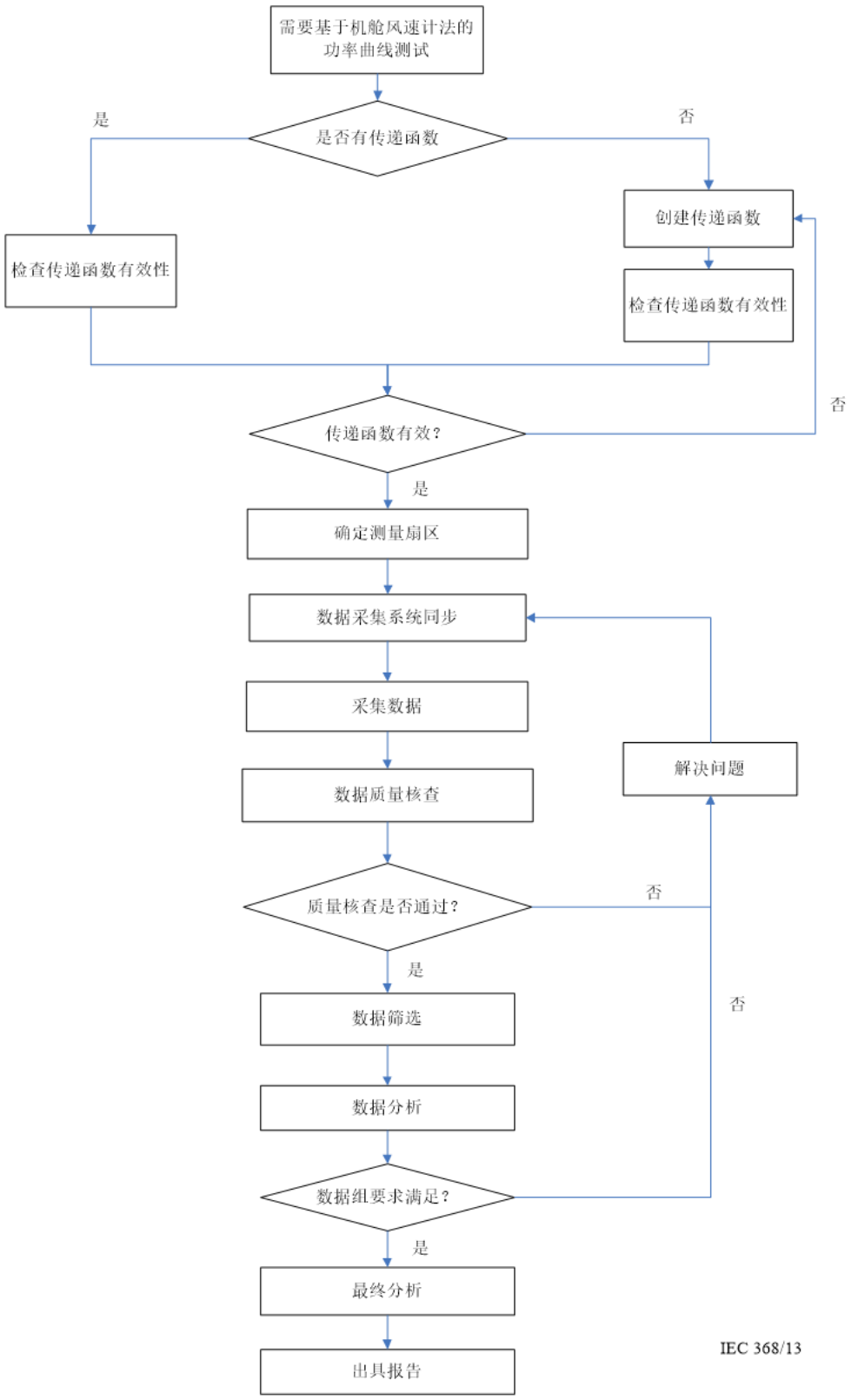



图1　机舱功率曲线（NPC）测试方法的简要流程

# 6 功率特性测试的前期准备

## 6.1 概述

与风力发电机组功率特性测试相关的测试条件，应在测试报告中详细说明，详见第10章。

## 6.2 风力发电机组

如第10章中所详述，应评估、描述并记录用以唯一确定待测风力发电机组的配置的风力发电机组信息。

风力发电机组配置对风力发电机组机舱功率曲线测试有重要影响。特别是机舱和风轮引起的气流畸变效应会使风力发电机组机舱风速与自由流风速不同，虽然它们是彼此相关的。

使用机舱风速传递函数确定机舱功率曲线（NPC）的机组所在地形应与机舱风速传递函数（NTF）测试机组所在地形类似，如果不是，机舱机舱风速传递函数用于平坦地形。

应评估风力发电机组配置以确定影响机舱风速传递函数的来源，从而：

a) 确定预先得到的机舱风速传递函数的有效性（见附录 A）；

b) 确评估气流畸变引起的不确定度（见附录 B、附录 C 和附录 D）。

根据附录A进行的核查应该作为风力发电机组评估的一部分。风力发电机组的配置应按第10章的详细要求进行报告。

## 6.3 试验场地

试验场地的条件可能会显著增加功率特性测试的不确定度。和安装在测风塔上的风速计相比，机舱风速计接近理想的测试位置（风轮中心），减少了风速的畸变的影响，但测试结果仍然受到风轮、地形和障碍物的影响。

应该评估试验场地以确定影响气流畸变的来源，从而：

c) 在考虑障碍物位置和地形分级情况下确定合适的测量扇区；

d) 评估气流畸变引起的功率曲线不确定度。

应特别考虑以下因素：

e) 地形变化和相关的粗糙长度（根据 IEC 61400-12-1 定义）；

f) 其它风力发电机组

g) 与风速、风向相关的湍流；

h) 障碍物（建筑物、树等）。

两个因素特别重要：

——被测风力发电机组上风向的其它风力发电机组和大型障碍物产生的尾流将会影响风力发电机组功率输出以及机舱风速计的测量。目前，还没有有效的技术可以使这种影响降低到最小，因此，尾流应该避免；

——地形变化可能改变风力发电机组处风向的垂直方向角。根据风速计在机舱上安装位置的不同，机舱风速传递函数可能会根据垂直方向角发生重要变化。因此，应该评估机舱风速计的当地风速和垂直方向角的关系。基于这个关系和试验场地地形，可以排除某些风向。

测量扇区应该根据IEC 61400-12-5的程序确定。强烈建议注意10 °风向区间内的平均倾角从而确保整个测量扇区有同样的符号—即测量扇区内的地形沿风力发电机组向下倾斜或向上倾斜。测量扇区内既有向下又有向上倾斜的情况就非常麻烦，因为机舱风速传递函数对此非常敏感。因此，测量扇区的地形应该被严格限制具有同样的正负号，只有从同一种倾斜符号导出的，且满足其它地形分级有效性要求（见6.3）的机舱风速传递函数才可能被采用。

试验场地和测量扇区的情况应按第10章的详细要求进行报告。

### 6.4 机舱风速传递函数

确定风力发电机组功率特性的方法需要机舱风速传递函数。如果风力发电机组的风速使用机舱风速计测量，则这个传递函数可推算出风力发电机组风轮中心位置的自由流风速。

如果机舱风速传递函数尚未得到，那么机舱风速传递函数就应按IEC 61400-12-6的步骤测量。如果传递函数已得到，就应按附录A验证有效性。如果确定传递函数有效，那么它就可以用作机舱功率曲线测试，否则机舱风速传递函数应按IEC 61400-12-6测量。

如果在机舱功率曲线测试期间，利用了之前在同样风电场得到的机舱风速传递函数，那么在与该地形级别相差不超过一级的地形上也可以应用该机舱风速传递函数。地形在同一个测量扇区内倾角应有同样的正负号（请注意这也适用于包含多个地形级别的风电场）。

如果机舱功率曲线测试期间，利用了之前在不同风电场得到的机舱风速传递函数，那么只能在与该地形分级相同的地形上应用机舱风速传递函数。地形在同一个测量扇区内倾角应有同样的正负号。

地形复杂性根据6.2分级。机舱风速传递函数引起的不确定度按IEC 61400-12-6评估。

### 6.5 测试计划

测试之前应制定测试计划，该计划应包含第10章中的信息，并在测试之前予以确认。附录H是关于测试组织、安全和交流的导则。

## 7 测试设备

### 7.1 电功率

风力发电机组净有功功率的测量应采用功率测量装置（例如：功率变送器），并基于每相的电流和电压进行。

电流互感器级别应满足 IEC 60044-1 的要求；如果使用电压互感器，级别应满足IEC 60044-2的要求。两种互感器的级别应为0.5级或更高。

如果功率测量装置是功率变送器，它的准确度应满足IEC 60688的要求，级别为0.5级或更高。如果功率测量装置不是功率变送器，则其测量准确度应等同于功率变送器的0.5级。功率测试装置的量程应设置为测量风力发电机组瞬时功率的正负峰值。建议功率测试装置的满刻度量程应设置为风力发电机组额定功率的-50% 到200%。在测试期间所有数据都应作周期性检查，以确保不超过功率测量装置的量程。这也包括了现场验证的可能性。功率测试装置应安装在风力发电机组和电气连接点之间，以确保测量的仅是净有功功率，即减去风力发电机组消耗的功率，应说明测量是在变压器的风力发电机组侧还是电网侧进行。

功率测试设备（电流互感器，电压互感器，功率测量装置）应校准并可溯源至国家标准。或者，用已校准电能表进行现场比较。应记录现场流程及比较结果。

## 7.2 风速

机舱风速应该按照 IEC 61400-50-1的要求测量。机舱风速的更多要求见附录E。

## 7.3 风向

机舱风向应该按照 IEC 61400-50-1的要求测量。

## 7.4 空气密度

空气密度应通过测量得到的环境气温和气压利用式（3）得到（见第9章）。在高温时推荐测量环境相对湿度，在考虑湿度效应的情况下，对空气密度根据式（1）来进行修正。

$$\rho = \frac{1}{T}\left(\frac{B}{R_0} - \phi P_{\mathrm{w}}\left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{\mathrm{w}}}\right)\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

式中：

$B$ ——大气压[Pa]；

$T$ ——绝对温度[K]；

$\phi$ ——相对湿度（范围从0~1）；

$R_0$ ——干燥空气的气体常数[287.05J/kgK]；

$R_w$ ——水蒸汽的气体常数[461.5J/kgK]；

$P_w$ ——水蒸汽压力[Pa]。

$$P_w = 0.0000205e^{0.0631846\mathrm{T}} \quad \cdots\cdots(2)$$

式中：

蒸汽压力$P_w$与平均气温有关。

温度、气压和湿度测量应该在外部环境（即非机舱内部环境）中进行。如果气压传感器装在风力发电机组上，它应安装于不受叶片或其它设备如通风系统等影响的位置。

温度传感器（和湿度传感器）应该装在轮毂高度10m范围内，安装位置在风力发电机组上或在4倍风轮直径以内的测风塔上。温度传感器应测量外部环境温度，不应受风力发电机组设备如通风系统或加热系统的影响。如果不测湿度，高温时需要对湿度进行修正，式（1）中取$\phi$=0.5。

气压计应该装在风力发电机组5km范围内，且与机舱功率曲线测量系统在10 min内同步。如果气压计没有安装在风力发电机组轮毂海拔高度，需要根据ISO 2533修正到风轮中心高度。

温度信号的合成不确定度应该小于3℃，气压的合成不确定度应小于10hPa。

### 7.5 风轮转速

应该测量风轮转速，或通过核查验证风力发电机组相关参数设置在测试期间没有发生改变。这个测量将用来保证机舱风速传递函数应用的有效性。

### 7.6 桨距角

应该测量桨距角，或通过核查验证风力发电机组相关参数设置在测试期间没有发生改变。这个测量将用来保证机舱风速传递函数应用的有效性。

### 7.7 风力发电机组状态

应有足够的状态信号被识别、验证并监控，来确保8.6剔除标准的应用。状态信号应能判断受限运行状态，如降噪运行或限功率运行。典型的，发电机并网信号是必需的。可以从风力发电机组控制器获得这些参数。推荐通过获得一个“可用状态”信号来确定风力发电机组的运行状态（可用或不可用）。每个状态信号的定义需要在报告中给出。

推荐按照第10章（表1）的描述，跟踪机组的在线和离线运行情况。

### 7.8 数据采集器

数据采集系统用于收集测量数据并存储预处理数据，每个通道的采样速率至少是1Hz。

风力发电机组控制器数据系统（即，SCADA系统）可以用来采集数据，只要它符合要求并能够对信号进行溯源及处理。

将已知信号接入传感器输出端并将这些输入信号与记录数据进行比较，可以验证数据采集系统通道（传输，信号调理和数据存储）的校准和准确度，这些可利用可溯源校准到国家标准的设备进行。通常，与传感器的不确定度相比，数据采集系统的不确定度可忽略不计。

对数据采集系统采集的任何影响或运行特性都应被记录。如下事项需要核查：

a) 数据采集系统对数据进行的任何平均或滤波应被详细记录，用以评估它对数据质量和数据不确定度的影响；
b) 应详细记录任何数据的内部校准、应用偏移或修正，从而无需在数据处理过程中再次重复；
c) 计算每个信号完整数据链的不确定度；
d) 应当正确处理风向 0 位附近的跳跃数据平均（360 °到 0 °的转换，反之亦然）方式。

如果由于风力发电机组控制器数据系统被占用，本节提出的条件不能满足，那么应安装使用一个独立的满足要求的数据采集系统。

## 8 测量程序

### 8.1 概述

测量程序的目标是采集满足一系列明确定义标准的数据，测量程序应确保这些数据有足够的数量和质量，以精确确定风力发电机组功率特性。如第10章所述，测量程序应详细记录，使每个步骤和测试条件都可以重新查看，如有必要，可以重复测量。

如附录B所述，测量准确度可以用测量不确定度表述。测试期间，数据应周期性检查以保证测试结果的高质量及可重复性。这些核查应该记录在报告中。在功率特性测试期间，应把所有重要事件写入工作日志。

### 8.2 风力发电机组运行

在测试期间，风力发电机组应按照其运行手册中的规定正常运行，同时风力发电机组的配置不能改变。通过第7章所述状态信号记录风力发电机组的运行状态，并在报告中说明整个测试期间运行状态没有发生变化。测试期间，可对风力发电机组进行正常维护，但应在测试日志中记录。任何特殊维护操作，如为了保证良好的功率特性所进行的经常性叶片清洗都应特别注明。默认情况是不进行此类特殊维护，除非测试开始前签约双方有约定。

### 8.3 数据系统同步

如果信号用多于一个的数据采集系统测量，所有系统在整个测试期间应保持同步。任意两个数据采集设备间最大的同步时间差应小于平均时间的1%。任何违反同步要求的事件应计入报告。气压测试不包含在本要求中。

推荐使用同一测试系统以避免时间同步问题。推荐使用UTC时间或基于UTC时间的参考时间进行同步。时间修正应计入日志。所选参考时间应记入报告。

### 8.4 数据收集

数据应该以1 Hz或更高的采样速率连续采集。数据采集系统应至少储存所有信号的下列统计数据：

a) 10 min 平均值；

b) 10 min 标准差；

c) 10 min 最大值；

d) 10 min 最小值。

如果不是所有信号都能记入数据收集系统，那么应记入所有风速和功率的10 min最小值、10 min最大值、10 min标准差和10 min平均值。其它信号存储10 min平均值即可。

所选数据组应基于10 min的连续测量数据。数据应持续采集，直到满足8.8中的要求。

标准分析将基于测试数据的10min统计值。这样选择的目的是为了所得测试结果与IEC 61400-12-1密切关联。

需要注意，10 min统计数据的选择会影响功率特性测试的结果，例如湍流效应。选择10 min数据是考虑了风从测风塔流到风力发电机组的时间，从而保证风速和功率合理相关。对于机舱风速计，就不一定需要10 min周期数据。对于将平均时间缩短至小于10 min，目前存在争议。

为了与IEC 61400-12-1保持一致性，同时不影响报告准确度，应选择始终基于10min统计数据报告测量结果，但也允许以更短的平均时间进行分析及报告。当使用更短平均周期的数据时，需要核查所应用的传递函数的有效性。

## 8.5 数据质量核查

### 8.5.1 概述

为保证包括最终有效数据在内结果的准确性，需要在数据剔除和分析时或在此之前进行质量控制。接下来的内容列出了质量核查方法的例子，但不包括所有要求的方法。不符合使用者质量控制标准要求的数据点应予以删除。所有数据剔除方法需要按第10章的要求完整地记入报告。除了测量系统的核查/校准，这些步骤也包括6.1的描述中。

### 8.5.2 测试信号在量程内且可利用

确保超出量程的所有要求信号的数据组从有效数据库中剔除。类似的，剔除数据组中包括不可利用或不运行的数据。这些剔除需要按第10章的要求描述。

### 8.5.3 传感器正常运行

数据信号的平均值、最大值、最小值、标准差应定期核查以保证数值与期望值的一致性（例如，没有严重的信号噪声；或受到安装结构或其它传感器影响的数据）。除了利用自动检测手段，建议手动检查测量数据（数据库采样）的子集的时间序列和/或测试数据的散点图，确保发现所有不合规的数据。此外，相似信号间的比较（例如测风塔主次风速计的比较、风力发电机组测试功率与独立功率信号的比较、风力发电机组偏航位置与测风塔或邻近风向测试设备的比较）保证偏差与期望值一致。可疑数据应当被剔除。这些剔除应按第10章的要求计入报告。

### 8.5.4 确保数据采集系统正常运行

下列步骤应用来验证数据采集系统在测试期间的正常运行，这些步骤包括但不限于：

a) 确保数据记录没有重复；

b) 研究任何测试数据不连续的原因；

c) 研究任何不是由于数据不连续导致的信号不连续。

发现的任何情况都应计入报告。核查本身也应计入报告。

### 8.5.5 扇区自身一致性核查

一旦得到（初步的）机舱功率曲线，就可以按IEC61400-12-5:2022进行扇区自身一致性核查。

## 8.6 数据剔除

一些数据组应予以剔除以保证：

a) 分析和结果与风力发电机组的正常运行条件相吻合；

b) 被破坏的或不精确的数据予以剔除。

下面情况下的数据组应从数据库中剔除：

1) 风速以外的其他外部条件超出风力发电机组的运行范围；
2) 外部条件超出测试设备的运行范围；
3) 风力发电机组不在网（除了风力发电机组正常运行时的暂时脱网，例如发电机切换。这些影响可在功率曲线中捕获到，准确的数据筛选应计入报告）；
4) 由于外部因素如电网引起的风力发电机组限功率，这些在现场文件中应当记录，例如日志或风力发电机组状态信号；
5) 测量仪器故障或降级（例如，由结冰引起）；
6) 10 min 风向在测量扇区之外；
7) 叶片结冰或机舱覆雪；
8) 风速超过机舱风速传递函数的适用范围；
9) 机舱风速传递函数无效期间的数据应予以剔除（即风力发电机组参数设置错误）；
10) 风力发电机组故障引起风力发电机组停机；
11) 风力发电机组手动停机或测试或维护模式运行。

其它任何剔除条件都应在报告中明确说明。所有由于这些标准剔除的数据应计入报告。

测量期间特殊运行条件（例如由灰尘，盐，昆虫和结冰引起的叶片高粗糙度）或大气条件（如降雨，湍流强度，风切变）下所收集的子数据库可以被选定为特殊数据库。

如果电网频率在600 s平均时间内变化超过1%，则应当测量电网频率。电网频率变化超过正常电网频率±1%时的数据应该单独分类或被剔除。

## 8.7 数据修正

对于所选数据组，需要进行下列数据修正：

a) 根据风力发电机组轮毂海拔高度修正气压值（如果 7.4 需要）；

b) 绝对风向应由机舱偏航位置和机舱风向标信号计算得到；

c) 风力发电机组控制器信号的修正应予以考虑，以保证使用了正确的最终信号值；

d) 数据可根据数据采集系统进行任何校准、应用偏移和特性修正（只要适用），以保证数据的高质量，并在报告中清晰描述；

e) 使用 IEC 61400-12-6 机舱风速传递函数（NTF）方法将机舱风速修正至自由流风速；

f) 对数据的任何其它修正应在报告中明确指出。

数据的修正细节应当按照第10章中的详细要求进行报告。

### 8.8 数据库

数据标准化之后（见9.1），应采用“区间法”对所选数据组进行分类（见9.2）。所选数组应至少覆盖从切入风速到风力发电机组85%额定功率时对应风速的1.5倍的范围。或者，从切入风速到“*AEP*-测量”大于或等于95%“*AEP*-外推”（见9.3）时对应风速的范围。应在报告中说明使用了上述哪一种方法确定测量功率曲线的风速范围。风速范围以0.5m/s整数倍的风速为中心，左右各0.25 m/s的连续区间进行划分。

当满足下列标准时，数据库应视为是完整的：

a) 每一个区间至少包含 30 min 的采样数据；

b) 数据库包含至少 180 h 的采样数据。

如果某一区间不完整导致测试不完整，则可用两个邻近区间的线性插值来估计其区间值。

为完善高风速时的功率曲线，可采用下述方法：当风速超过风力发电机组85%额定功率所对应的风速的1.6倍时，测量扇区可以开放。

采用上述两种扩展方法时，应满足以下条件：根据扩展方法得到的*AEP*测量值与一直扩展到最高完整风速区间的*AEP*外推值（按照9.3中的瑞利分布）之间的偏差小于1%。

数据库应在测试报告中表示出来，详见第10章。

## 9 导出结果

### 9.1 数据标准化-密度修正

空气密度由实测空气温度、气压和相对湿度确定：

$$\rho_{10\min}=\frac{1}{T_{10\min}}\left[\frac{B_{10\min}}{R_0}-\phi P_{\mathrm{w}}\left[\frac{1}{R_0}-\frac{1}{R_{\mathrm{w}}}\right]\right] \quad \cdots\cdots (3)$$

式中：

$\rho_{10\min}$ ——推导出的10 min内平均空气密度；

$T_{10\min}$ ——实测10 min得到的平均绝对气温；

$B_{10\min}$ ——实测10 min得到的平均气压；

$R_0$ ——干燥空气的气体常数[287.05J/kgK]；

$\phi$ ——相对湿度（范围从0~1）；

$R_{\mathrm{w}}$ ——水蒸汽的气体常数[461.5J/kgK]；

$P_{\mathrm{w}}$ ——水蒸汽压力[Pa]；

$P_w$=0.0000205e$^{0.0631846T}$，其中，蒸汽压力$P_w$取决于平均气温$T$ [K]。

所选数据组应至少标准化到参考空气密度。参考空气密度应是测试期间在试验场地采集到的数据中有效测量空气密度的平均值或者试验场地预定义的正常空气密度。平均测试空气密度应是0.01kg/m$^3$的整数倍并按第10章记入报告。

对定桨距、定转速的失速调节风力发电机组，应根据式（4）对其实测输出功率进行标准化：

$$P_n = P_{10\text{min}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{10\text{min}}} \quad \cdots\cdots(4)$$

式中：

$P_n$ ——标准化的输出功率；

$P_{10\text{min}}$ ——测量功率10 min平均值；

$\rho_0$ ——参考空气密度。

对主动功率控制的风力发电机组，应根据式（5）对风速进行标准化：

$$V_n = V_{\text{free}} \left( \frac{\rho_{10\text{min}}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad \cdots\cdots(5)$$

式中：

$V_n$ ——标准化的风速；

$V_{\text{free}}$ ——测量机舱风速10 min平均值，根据IEC 61400-12-6机舱风速传递函数（NTF）修正。

## 9.2 测量功率曲线的确定

测量功率曲线是对标准化后的数据组用“区间法”确定的，即用0.5 m/s的区间，依据式（6）、（7）对每一风速区间计算标准化后的平均风速和标准化后的输出功率平均值得到。

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad \cdots\cdots(6)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad \cdots\cdots(7)$$

式中：

$V_i$ ——第$i$个区间标准化平均风速；

$V_{n,i,j}$ ——第$i$个区间数组$j$标准化风速；

$P_i$ ——第$i$个区间标准化平均输出功率；

$P_{n,i,j}$ ——第$i$个区间数组标准化输出功率；

$N_i$ ——第$i$个区间内10 min数组的个数。

测试功率曲线应按第10章给出。

## 9.3 发电量

年发电量是通过采用测量功率曲线对不同参考风速频率分布曲线进行估计得到的。参考风速频率分布应采用与形状因数为2的威布尔分布完全相同的瑞利分布。当轮毂高度年平均风速分别为4m/s、5 m/s、6 m/s、7 m/s、8 m/s、9 m/s、10 m/s和11 m/s时，可根据式（8）估算年发电量。

$$AEP = N_{\mathrm{h}} \sum_{i=1}^{N} [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (8)$$

式中：

*AEP*——年发电量；

$N_{\mathrm{h}}$ ——一年中的N小时数，约8760小时；

$N$ ——区间的个数；

$V_i$ ——第*i*个区间标准化平均风速；

$P_i$ ——第*i*个区间标准化平均输出功率。

$$F(V) = 1 - \exp\left( -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{V_{\mathrm{ave}}} \right)^2 \right) \quad (9)$$

式中：

$F(V)$——风速的瑞利累积概率分布函数；

$V_{\mathrm{ave}}$ ——轮毂高度的年平均风速；

$V$ ——风速。

求和初始化：设置$V_{i-1}$ 等于（$V_i$-0.5）m/s，$P_{i-1}$ 等于0.0kW。

特定情况下，可假设已知试验场地的风况条件。这种情况下，可能还需根据现场具体信息对现场特定*AEP*作出报告并计算。

*AEP*应通过两种方法计算，一种称为“*AEP*-测量值”，另一种称为“*AEP*-外推值”。如果测量功率曲线不包含一直到切出风速的数据，功率曲线应从最大测量风速外推到切出风速。

*AEP*-测量值应从测量功率曲线获得，前提是假设所有测量功率曲线范围之外的风速对应的功率均为零。

*AEP*-外推值应从测量功率曲线获得，前提是假设在测量功率曲线上，在最低风速以下风速对应的功率为零，在测量功率曲线的最高风速到切出风速之间的风速对应的功率为常数；外推*AEP*所用的恒功率应是在测量功率曲线的最高风速区间的功率值。

*AEP*-测量值和*AEP*-外推值应在测试报告中按照第10章所述要求给出。对所有的*AEP*计算，风力发电机组可利用率应设为100%。对给定的年平均风速，当计算表明*AEP*-测量值小于*AEP*-外推值95%时，应把*AEP*-测量值标记为“不完整”。

对所有给定的年平均风速的*AEP*-测量值，根据附录B、附录C和附录D要求，应在报告中说明其估计的年发电量*AEP*标准不确定度。

如上所述，*AEP*不确定度仅针对功率特性测试引起的不确定度，没有考虑其它与给定风力发电机组实际发电量相关的重要因素引起的不确定度。例如：

a) 风资源的不确定度；

b) 风力发电机组可利用率的不确定度；

c) 气流和尾流模型的不确定度。

### 9.4 功率系数

测试结果中应加入风力发电机组功率系数$C_p$，详细描述见第10章。$C_p$由测量功率曲线确定，见式（10）：

$$C_{P,i}=\frac{P_i}{\frac{1}{2}\rho_0 A V_i^3} \quad \cdots\cdots(10)$$

式中：

$C_{p,i}$ ——第$i$个区间的功率系数；

$V_i$ ——第$i$个区间标准平均风速；

$P_i$ ——第$i$个区间标准化平均输出功率；

$A$ ——风轮扫掠面积；

$\rho_0$ ——参考空气密度。

### 9.5 不确定度分析

应根据附录B、附录C和附录D进行不确定度分析。在某些环境下，应参照附录F和附录G通过多次测试得到平均功率曲线。

## 10 报告格式

测量程序应详细记录，使每个步骤和测试条件都可以重新查看，如有必要，可以重复测量。本标准将报告和文档作了区分。测试部分应保留所有文档（即使文档不出现在报告中）。文档应保留至规定的时限结束，根据ISO 17025的要求，一般为十年，例如风力发电机组的维护记录。以下是机舱功率曲线测试报告的最低要求。

测试报告应至少包括a）—m）中的信息：

a) 被测风力发电机组具体结构的识别及描述，详细到能够评估出风力发电机组传递函数的有效性（见 6.1）的程度，其中包括：

   1) 风力发电机组制造商，型号，序列号，出厂日期，机舱描述（如：图，测量值，照片）以及型号，轮毂描述；

   2) 风轮直径和对所用验证方法描述或风轮直径的参考记录；

   3) 风轮转速或转速范围；

4) 额定功率和额定风速；
5) 叶片数据：制造商，型号，序列号，叶片个数，定桨距/变桨距，零桨距角偏移和正常桨距角；
6) 塔筒型号，高度和轮毂高度；
7) 航空灯类型，尺寸，位置和其它机舱上辅助设备的描述；
8) 控制系统描述（设备和软件版本号）包括但不限于用来进行数据剔除的状态信号文档；与传递函数测试相关的风力发电机组控制参数通过协议各方得到，（例如，桨距角，偏航，机舱风速和风向转速和功率）；
9) 风力发电机组的并网条件描述，即电压、频率及其允许偏差范围，及描述功率变送器安装位置的接线图，特别是与内部或外部变压器和自身功率消耗有关的情况；
10) 机舱风速计和风向标安装位置的照片和安装结构，预校准和后校准，数据采集方法，数据采集平均时间；
11) 机舱风速计和风向标的信号类型，信号调理，信号链描述。

b) 试验场地描述（见 6.3），包括：
1) 所有测量扇区照片，最好从风力发电机组的轮毂高度拍摄；
2) 覆盖至少以 20 倍风轮直径为半径的周围区域的试验场地地图，并指明地形，风力发电机组、测风塔和有影响障碍物的位置，其它风力发电机组，植被类型和高度，以及测量扇区；
3) 场地评估结果，按 6.3 地形分级过程进行报告；
4) 如果场地标定用来建立机舱风速传递函数，应记录最终测量扇区；
5) 地形描述，包括不同方向倾角的评估；
6) 现场空气密度。

c) 测试设备描述，包括场地标定，机舱风速传递函数，机舱功率曲线测试（见第 7 章）：
1) 传感器及数据采集系统的识别，包括对传感器、传输线和数据采集系统的校准记录；
2) 机舱上风速计布置安装结构的描述，按照 IEC 61400-50-1 的要求；
3) 安装结构的示意图展示结构和设备安装的原则；
4) 现场校准方法的描述（如果适用），进行校准的结果文档；
5) 功率、风速、风向、温度和气压端对端校准的结果。

d) 测量程序描述：
1) 测试步骤、测试条件、采样速率、平均时间和测量周期的报告；
2) 数据剔除文档，包括精确的剔除标准限定值，剔除命令和被剔除数据点的总数；
3) 所有数据修正文档；

4) 记录了测试期间所有重要事项的测试日志，包括测试期间的所有维护活动的一览表（清单）和为保证风力发电机组性能良好而进行的特殊事件（例如叶片清洗）的一览表；

5) 不在 8.6 中的数据剔除标准；

6) 如果使用了多于一个测试系统，则应给出关于所有系统均保持同步的声明。记录下这些系统间的最大时间差，并用图表呈现出在测量作业期间对每个测量系统进行的时间修正。

e) 用表格和图形两种形式来表示每个所选数据组中的数据，给出测量输出功率与风速及其它重要气象参数的统计关系，包括（参考 8.4 到 8.8）：

1) 输出功率的平均值、标准差、最大值和最小值与风速关系的散点图（数据点应包括采样速率信息）。如图 3 的示例；

2) 平均风速与风向关系的散点图；

3) 对于特殊运行工况或大气条件下收集构成的特殊数据库，按照 8.6 的规定，也应采用上述方法给出相应的关系图表；

4) 如果测量了转速和桨距角，给出包括分区后数据的转速和桨距角与风速关系的散点图及表格（包括分区值与风速）；

5) 状态信号的定义和测试期间的状态信号图。

f) 所选用参考空气密度的测量功率曲线表示（见 9.1 和 9.2）：

1) 功率曲线应以与表 5 类似的表格表示。表格应列出每一风速区间内的：

——归一化和平均风速；

——归一化和平均功率输出；

——数据集的数量；

——计算的Cp值；

——A类标准不确定度（见附录B和附录C）；

——B类标准不确定度（见附录B和附录C）；

——组合标准不确定度（见附录B和附录C）。

2) 应提供与图 2 和图 3 类似的功率曲线。该图应表示为标准化平均风速的函数：标准化平均输出功率；合成标准不确定度。

3) 给出与图 4 类（相）似的 Cp 曲线。图中应标明风轮扫掠面积；

4) 所有的图和表都应说明其参考空气密度，并进行标准化处理。

g) 对应场地实际空气密度的测量功率曲线图：

如果场地平均空气密度不在标准空气密度的±0.05 kg/m3范围内，则应提供另一条测量功率曲线。该曲线图应与标准空气密度对应的功率曲线图一样，但该图上应标出对试验场地实际空气密度进行标准化处理后得到的功率曲线结果。

如果选用多于一个的参考空气密度，则应提供另一个对所有其它参考空气密度的测量功率曲线。该曲线图应与参考空气密度的功率曲线图一样，但该图上应标出对再次选用的参考空气密度进行标准化处理后得到的功率曲线结果。

h) 特殊运行工况和大气条件下测量功率曲线图（见 8.6）：

可能也需要报告在特殊运行工况和大气条件下采集数据形成的功率曲线。在这种情况下，应将针对海平面空气密度的功率曲线计入报告中，并在所有图、表中清楚标出该特殊运行工况和大气条件。

i) 对应参考空气密度的估计年发电量图（见 9.3）：

1) 含每一轮毂高度年平均风速的表格应包含：

——*AEP*-测量值；

——*AEP*-测量值的标准不确定度（见附录B和附录C）。

2) 表格还应写明:

——参考空气密度；

——切出风速。

3) 若在任何年平均风速下的 *AEP*-测量值都小于 *AEP*-外推值的 95%，应在表格 *AEP*-测量值一栏中注明“不完整”。

j) 对应场地实际空气密度的估计年发电量图（见 9.3）：

如果场地平均空气密度不在标准空气密度的±0.05 kg/m3范围内，则应再作一个*AEP*表格。这个表格与标准空气密度对应的表格形式相同，并应给出标准化到场地实际空气密度下的*AEP*结果。

如果选用多于一个的参考空气密度，则应提供另一个对所有其它参考空气密度的*AEP*表。这个表格与参考空气密度对应的表格形式相同，并应给出对又一参考空气密度进行标准化处理后的*AEP*结果。

k) 建立机舱风速传递函数结果图：机舱风速传递函数及其不确定度应按 IEC 61400-12-6 给出。

l) 测量不确定度（见附录 B）：

按附录B、附录C、附录D给出所有不确定分量的不确定度假设，及不确定度比重和修正/未修正的不确定度。

m) 与测量程序的偏离：

任何与本标准要求的偏离都应当在测试报告中以单独章节予以清楚阐明，每一偏离都应有技术上的基本原理支持及其对测试结果影响的估计上的支持。

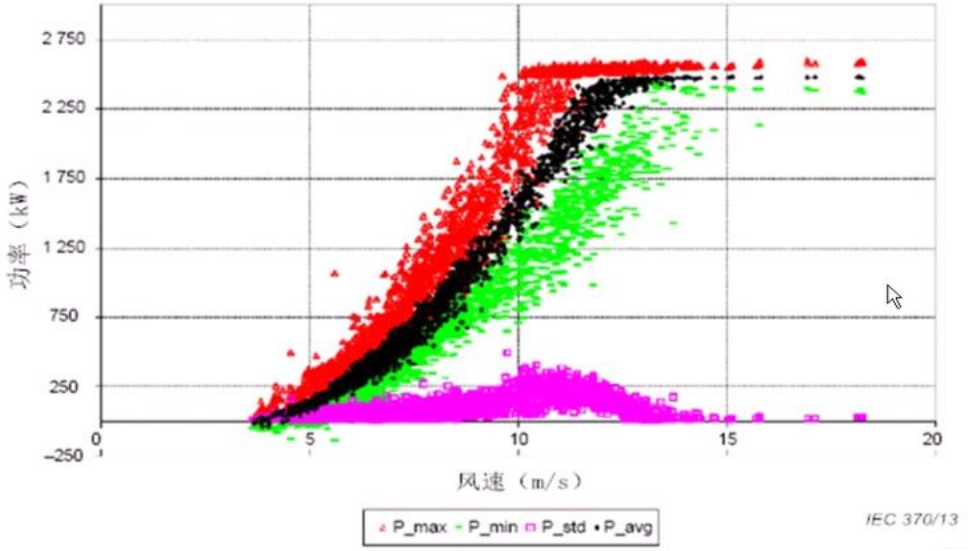



图2　示例数据表示：机舱功率特性测试散点图

注：拟合传递函数是用来根据实测机舱风速估算出自由流风速

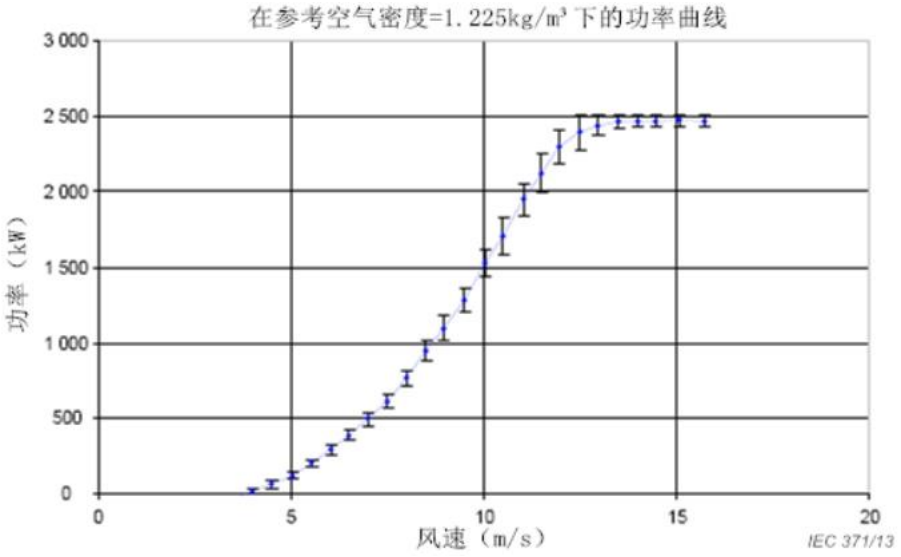



图3　示例数据表示：区间功率曲线与不确定度带

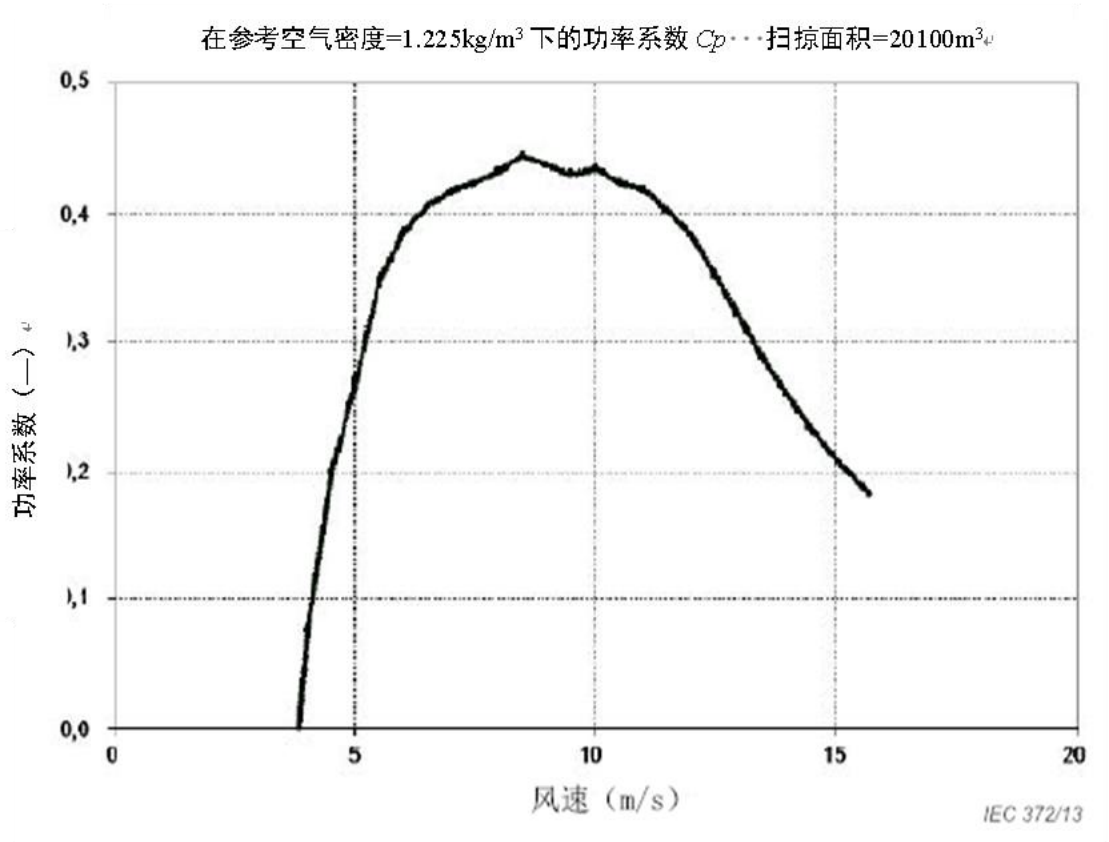



图4　示例数据表示：实测 Cp 曲线

表1　实测功率曲线示例

| 风力发电机组修正机舱风速 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 标准空气密度：1.225 kg/m³ | | | | | A类<br>标准不确定度<br>$s_i$<br>[kW] | B类<br>标准不确定度<br>$u_i$<br>[kW] | 合成<br>标准不确定度<br>$u_{ci}$<br>[kW] |
| 区间编号 | 自由流风速<br>m/s | 功率输出<br>kW | $C_P$ | 数据组数 | | | |
| 7 | 3.71 | -9.3 | -0.053 | 3 | 2.35 | 20.43 | 20.56 |
| 8 | 4.00 | 17.2 | 0..077 | 24 | 5.21 | 23.37 | 23.94 |
| 9 | 4.52 | 64.2 | 0.201 | 27 | 5.57 | 23.89 | 24.53 |
| 10 | 5.03 | 119.9 | 0.272 | 77 | 3.49 | 25.89 | 26.12 |
| 11 | 5.53 | 204.6 | 0.349 | 124 | 3.32 | 33.49 | 33.65 |
| 12 | 6.02 | 293.4 | 0.386 | 200 | 3.26 | 36.25 | 36.40 |
| 13 | 6.51 | 389.0 | 0.406 | 231 | 3.41 | 40.48 | 40.62 |
| 14 | 7.00 | 298.8 | 0.418 | 240 | 4.46 | 46.40 | 46.62 |

| 风力发电机组修正机舱风速 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 标准空气密度：1.225 kg/m$^3$ | | | | | A类<br>标准不确定度<br>$s_i$<br>[kW] | B类<br>标准不确定度<br>$u_i$<br>[kW] | 合成<br>标准不确定度<br>$u_{ci}$<br>[kW] |
| 区间编号 | 自由流风速<br>m/s | 功率输出<br>kW | $C_P$ | 数据组数 | | | |
| 15 | 7.48 | 616.7 | 0.424 | 203 | 5.42 | 53.19 | 53.47 |
| 16 | 7.99 | 768.8 | 0.433 | 165 | 7.23 | 65.46 | 65.86 |
| 17 | 8.49 | 946.0 | 0.445 | 163 | 7.86 | 81.83 | 82.21 |
| 18 | 8.97 | 1098.1 | 0.438 | 118 | 10.89 | 75.82 | 76.60 |
| 19 | 9.50 | 1282.5 | 0.431 | 90 | 12.11 | 87.63 | 88.47 |
| 20 | 10.03 | 1526.5 | 0.435 | 86 | 12.84 | 117.68 | 118.38 |
| 21 | 10.50 | 1707.7 | 0.424 | 84 | 12.41 | 105.27 | 105.99 |
| 22 | 11.03 | 1950.9 | 0.419 | 111 | 10.61 | 129.94 | 130.37 |
| 23 | 11.48 | 2119.7 | 0.403 | 112 | 12.68 | 109.25 | 109.98 |
| 24 | 11.98 | 2296.7 | 0.385 | 113 | 8.87 | 110.43 | 110.78 |
| 25 | 12.50 | 2393.5 | 0.352 | 80 | 5.49 | 64.97 | 65.20 |
| 26 | 12.97 | 2440.6 | 0.322 | 49 | 5.34 | 45.24 | 45.55 |
| 27 | 13.50 | 2462.5 | 0.288 | 29 | 2.56 | 35.00 | 35.10 |
| 28 | 13.99 | 2469.1 | 0.260 | 17 | 1.01 | 32.57 | 32.58 |
| 29 | 14.45 | 2469.1 | 0.235 | 5 | 1.32 | 32.24 | 32.27 |
| 30 | 15.07 | 2472.3 | 0.208 | 3 | 0.46 | 32.32 | 32.33 |
| 31 | 15.72 | 2472.0 | 0.183 | 3 | 0.56 | 32.27 | 32.27 |

表2　预计年发电量示例

| **预计年发电量（数据库A）**<br>**类型：风力发电机组机舱风速计传递函数TF，位置：IEC PT 61400-12-2**<br>**标准空气密度：1.225 kg/m$^3$**<br>**切出风速：25m/s**<br>**（从最后一个区间开始按恒定功率外推）** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 轮毂高度处的年平均风速（瑞利分布）<br>m/s | *AEP*测量值（测量功率曲线）<br>MWh | *AEP*<br>标准不确定度<br>MWh | *AEP*<br>标准不确定度<br>% | *AEP*外推值（外推功率曲线）<br>MWh | |
| 4 | 1256 | 197 | 15.5 | 1256 | |
| 5 | 2732 | 359 | 13.2 | 2738 | |
| 6 | 4505 | 520 | 11.7 | 4579 | |
| 7 | 6186 | 618 | 10.2 | 6518 | 不完整 |
| 8 | 7484 | 647 | 8.9 | 8360 | 不完整 |
| 9 | 8306 | 665 | 8.3 | 9988 | 不完整 |
| 10 | 8695 | 659 | 7.9 | 11335 | 不完整 |
| 11 | 8753 | 609 | 7.3 | 12372 | 不完整 |

# 附 录 A
（规范性）
机舱风速传递函数有效性程序

## A.1 概述

传递函数可能会受到风力发电机组硬件和控制器的严重影响。本附录描述了一个用来核查风力发电机组传递函数是否可以用在另一个风力发电机组上的标准。本附录介绍了一个风力发电机组机舱风速传递函数应用到另一个风力发电机组上的标准（或相同风力发电机组不同数据的比较）。以下条款A.2到A.6需要在测试开始前核查，确定他们使用了相同的限制条件。

如果不满足这些有效性标准中的任何一个，则应使用另一个传递函数。应详细报告有效性核查，本附件中的9项检查都有证据支持。请注意，对有效测试结果出具报告前，还应进行扇区自一致性核查（见IEC 61400-12-5:2022，8.2）。然而，IEC 61400-12-5:2022，8.2中的核查只能在机舱功率曲线（NPC）可用后进行，而本附件中的核查可以在测试开始前进行。

## A.2 测试程序

用于计算机舱风速传递函数的各数据点的平均时间应与计算机舱功率曲线的数据的平均时间相同。

## A.3 地形分级和坡度

机舱风速传递函数建立时的地形级别应与机舱风速传递函数应用时的地形级别相同，除非测量机舱风速传递函数的风电场与应用它的风电场是同一个，地形级别可以有±1级的变化。

应比较测量扇区内10 °扇区的倾角的正负号；正负倾角不能混合。对于有正负倾角混合出现的测量扇区。

机舱风速传递函数建立时测量扇区内的地形倾角正负号应与机舱风速传递函数应用时测量扇区内的地形倾角正负号相同。

## A.4 测试硬件

主要测试硬件有风速计和风向标，测试中应记录内容包括：

a) 风速计和风向标类型；

b) 风速计和风向标的正确位置（相对于安装结构），偏差不超过 5 mm；

c) 风速计、风向标和安装结构在机舱的正确位置偏差不超过 100 mm。

## A.5 其他风力发电机组硬件

风力发电机组相关硬件应记录的内容包括：

a) 风力发电机组叶片类型，包括安装在叶片上的气动设备；

b) 机舱形状，差别不超过 100 mm；

c) 安装在机舱上的设备尺寸和位置（例如航空灯），偏差不超过 100 mm。

## A.6 风力发电机组控制

对于风力发电机控制系统，应记录的内容包括：

a) 控制软件和版本（如有改变，则根据风力发电机组制造商的评估，会对风力发电机组功率特性有重要影响）；

b) 对所有与控制变桨、偏航、转速、功率有关的参数和其它参数（如有改变，则根据风力发电机组制造商的评估，会对风力发电机组功率特性有重要影响）进行核查时，需要对具体参数及其相应的值进行比较；

c) 运行模式（如降噪运行或限功率运行）。

# 附 录 B
（规范性）
测量不确定度评估

## B.1 概述

本附录描述了确定测量不确定度的要求。附录C是使用区间法作为确定不确定度的理论基础，在附录D有估计不确定度的示例。

测试机舱风速传递函数（NTF）和机舱功率曲线（NPC）应按测量不确定度结果和其它像地形等因素的结果评估进行补充。计（估）算应基于ISO出版的“Guide to the expression of uncertainty in measurement”（测量不确定度表示导则）。本标准包含NTF不确定度评估指南，其评估结果应进一步纳入NPC不确定度评估中。

依据ISO导则，有两种类型的不确定度：A类，其不确定度的大小可从测量中推算；B类，通过其他方法估计。这两类不确定度都以标准差表示，并且表示为标准不确定度。

## B.2 被测对象

被测对象为功率曲线、风速和估计年发电量（见9.1和9.2），其中功率曲线由电功率和风速测量和标准化的区间值确定（见9.3）。测量不确定度通过灵敏度系数转换为被测对象的不确定度。

## B.3 不确定性成分

表B.1和表B.2给出了机舱功率曲线（NPC）不确定度分析中至少应包含的不确定度参数表。

**表B.1 机舱功率曲线评估的不确定度分量**

| 测试参数 | 不确定度分量 | 不确定度分类 |
|---|---|---|
| 电功率 | 电流互感器 | B |
| | 电压互感器 | B |
| | 功率变送器或功率测量设备 | B |
| | 数据采集系统 | B |
| | 电功率的变化 | A |
| 风速 | 基于风速的机舱风速计标定 | B |
| | 基于风向的机舱风速计标定 | B |
| | 运行特性 | B |
| | 安装影响 | B |
| | 地形引起的气流畸变 | B |
| | 机舱风速传递函数 | B |

| 测试参数 | 不确定度分量 | 不确定度分类 |
|---|---|---|
| | 数据采集系统 | B |
| 气温 | 温度传感器 | B |
| | 辐射屏蔽 | B |
| | 安装影响 | B |
| | 数据采集系统 | B |
| 气压 | 气压计 | B |
| | 安装影响 | B |
| | 数据采集系统 | B |
| 方法 | 空气密度修正 | B |
| | 动态功率测试 | B |
| | 季节变化 | B |
| | 来流相对风轮的变化 | B |
| | 湍流对区间划分的影响 | B |

表B.1和表B.2提到的分量包括了最少的不确定度分量。如有需要，可以增加不确定度分量。

注：本标准方法的假设是10 min平均功率输出完全可以由同时测量的机舱风速计10 min风速值（通过风力发电机组具体测量机舱风速传递函数NTF得到的自由流风速）和空气密度解释。其它气流变化影响了功率输出和机舱风速传递函数。因此即使轮毂高度自由流风速和空气密度相同，相同的风力发电机组在不同的场地也会有不同的输出功率和不同的机舱风速。其它变量包括风速的湍流波动（3个方向），相对水平湍流的气流倾斜，相对风轮的风切变。目前，现有分析工具很难帮助确定这些变量的影响，实验方法同样遇到麻烦。

结果是功率曲线会随场地而变化，但因为其它有影响的变量没有测量且不考虑，这些因素对功率曲线的变化通过不确定度表现。

通过观察不同地形和气候条件下功率输出的不同，得到的明显的不确定度。即，当比较同质地形下的*AEP*和不同质地形下的*AEP*。

很难量化这种不确定度。根据场地条件和气候条件的不同，机舱功率曲线的不确定度大约在10%或更高。总的来说，地形越复杂，在该地形下测试机舱风速传递函数（NTF）的不确定度和在该地形下测试机舱功率曲线（NPC）的不确定度可能会随着拓扑的复杂性和非中性大气条件频率的增加而增加。本标准通过增加诸如季节变化和相对风轮的来流等不确定度来说明。

## B.4 风向不确定度

风向的不确定度不直接影响功率曲线或*AEP*的不确定度。但根据附录B，它影响测量扇区的计算。因此这里给出了不确定度分量的评估。

风向测量不确定度由三个分量组成：偏航位置不确定度，机舱风向标不确定度和数据采集系统不确定度，见表B.2。此外，偏航位置不确定度包括对准（或传感器安装）不确定度和信号分辨率（或传

感器不确定度）不确定度。机舱风向测量不确定度包括校准不确定度（仅限超声波风向），现场校准不确定度和风轮效应和地形对测试的影响（后者包括具体试验场地的上升气流效应）。

表B.2 基于机舱绝对风向的不确定度分量

| 测试参数 | 不确定度分量 | 不确定度分类 |
|---|---|---|
| 偏航位置 | 场地标定 | B |
| | 信号分辨率 | B |
| 机舱测量风向 | 校准-传感器安装位置不确定度（仅限超声波传感器） | B |
| | 校准-基于风向的区间风向平均差异（仅限超声波传感器） | B |
| | 校准-基于非垂直气流的区间风向平均差异（仅限超声波传感器） | B |
| | 传感器对准 | B |
| | 风轮对平均测试风向的影响 | B |
| | 地形对平均测试风向的影响 | B |
| 数据采集系统 | 信号传输 | B |
| | 系统精度 | B |
| | 信号调理 | B |

# 附 录 C
（规范性）
# 区间法确定测量不确定度的理论基础

## C.1 概述

从NTF应用得到的修正风速的不确定度与NTF测量有关，也与NTF转移到相同的或其它同类型风力发电机组感受的来流条件不同于NTF测量时的主导来流条件有关。

评估不确定度时，测试NTF区间$i$的输出风速$u_{c,i}$或者NPC区间$i$的功率，合成标准不确定度通常表示为：

$$u_{\mathrm{c},i}^2 = \sum_{k=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} c_{k,i}u_{k,i}c_{l,i}u_{l,i}\rho_{k,l,i,j} \quad \cdots\cdots(\mathrm{C.1})$$

式中：

$c_{k,\mathrm{i}}$ ——区间$i$内分量$k$的灵敏度系数；

$u_{k,i}$ ——区间$i$内分量$k$的标准不确定度；

$c_{l,j}$ ——区间$j$内分量$l$的灵敏度系数；

$u_{l,j}$ ——区间$j$内分量$l$的标准不确定度；

$M$ ——每个区间内不确定度分量的个数；

$\rho_{k,l,i,j}$ ——区间$i$内不确定度分量$k$与区间$j$内不确定度分量$l$之间的相关系数（在C.1中仅使用对角元素$j=i$）。

不确定度分量是指每一个测量参数不确定度的单独输入量。年发电量估算的合成标准不确定度$u_{AEP}$最常见表示形式为：

$$u_{\mathrm{AEP}}^2 = N_{\mathrm{h}}^2\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} f_i c_{k,i}u_{k,i}\,f_j c_{l,j}u_{l,j}\rho_{k,l,i,j} \quad \cdots\cdots(\mathrm{C.2})$$

式中：

$f_i$ ——在区间$i$内$V_{i-1}$和$V_i$之间的风速相对出现的概率：$F(V_i)$-$F(V_{i-1})$；

$F(V)$ ——风速的瑞利累积概率分布函数；

$N$ ——区间的个数；

$N_{\mathrm{h}}$ ——一年中的小时数≈8760。

准确推导出所有相关系数$\rho_{k,l,i,j}$的值几乎是不可能的，所以通常很有必要简化。为使上述合成不确定度的表达式简化至实用水平，引入以下假设：

不确定度分量或是全相关（$\rho$=1，意味着通过线性求和得到合成标准不确定度），或是不相关（$\rho$=0，意味着求平方和，即合成标准不确定度是不确定度分量的平方和的平方根）；

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/387106123160006113