风能发电系统　风力发电机组机舱风速传递函数测量

1　范围

本文件描述了单台水平轴风力发电机组机舱风速传递函数的测量方法。

本文件适用于 IEC 61400-12-2 部分中所述的机舱风速传递函数的测量，不适用于 IEC 61400-2 所描述的小型风力发电机组机舱风速传递函数的测量。

风力发电机组的机舱或轮毂上测得的风速受风轮的影响（即加快或减缓风速）。在 IEC 61400-12-1 中，风速计位于测风塔上，而测风塔位于被测量风力发电机组上风向的 2 倍～4 倍风轮直径之间。该位置能够直接测量“自由”风，且受到被测量风力发电机组风轮的干扰最小。在本文件的程序中，风速计位于测量风力发电机组的机舱上或附近。在该位置，风速计测量的风速受到被测量风力发电机组风轮和机舱的强烈影响。本文件中的程序包括确定上述干扰并实施适当校正的方法，但应注意，与 IEC 61400-12-1 严格的测量要求相比，上述校正会增加测量不确定度。

本文件规定了如何根据采集一段时间内机舱实测风速和自由流风速（在测风塔上测得）的同时测量结果表征风力发电机组的机舱风速传递函数，该测量周期应足够长，从而可以建立一个包含一系列风速以及不同风况和大气条件并具有统计学意义的数据库。本文件还为确定测量不确定度提供了指导，包括不确定度源的评估以及合成不确定度的推荐值。

2　规范性引用文件

下列文档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，注日期的引用文档，仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文档，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

IEC 60688　用于将交流和直流电量转换为模拟或数字信号的电气测量变换器（Electrical measuring transducers for converting AC and DC electrical quantities to analogue or digital signals）

注：GB/T 13850—1998　交流电量转换为模拟量或数字信号的电测量变送器（IEC 688:1992,IDT）

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 measurement of electricity producing wind turbines）

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

IEC 61400-12-2　风能发电系统　第 12-2 部分：基于机舱风速计法的风力发电机组功率特性测试（Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry）

注：GB/T 33225—2016　风力发电机组 基于机舱风速计法的功率特性测量（IEC 61400-12-2:2013,IDT）

IEC 61400-12-3　风能发电系统　第 12-3 部分：功率特性测量场地标定（Wind energy generation systems-Part 12-3:Power performance-Measurement based site calibration）

IEC61400-12-5　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 61400-50-1　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

ISO/IEC Guide 98-3:2008　测量不确定度　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）

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.1]

3.2

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.5]

3.3

数据组　data set

在规定的连续时间段内采集的数据集合。

[来源：GB/T 33225—2016,3.6]

3.4

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.7]

3.5

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他风力发电机组引起的气流改变，其结果使测量风速相对自由流产生了严重的偏离。

[来源：GB/T 33225—2016,3.9]

3.6

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.10]

3.7

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.11]

3.8

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.12]

3.9

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.15]

3.10

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.16]

3.11

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.17]

3.12

区间法 method of bins

将测试数据按参照间隔分组的数据处理方法。

注1：区间法通常用于风速区间，但也可用于其他参数。

注 2：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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.18，有修改]

3.13

机舱 nacelle

在水平轴风力发电机组顶部包括传动链和其他部件的壳体。

[来源：GB/T 33225—2016,3.19]

3.14

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。

注1：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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.20，有修改]

3.15

机舱风速 nacelle wind speed

在风力发电机组机舱顶或风力发电机组前方测量的水平风速。

[来源：GB/T 33225—2016,3.21]

3.16

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.24]

3.17

桨距角 pitch angle

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

[来源：GB/T 33225—2016,3.25]

3.18

报告 report

在最终报告中出现的任何关于测试的信息。

[来源：GB/T 33225—2016,3.29]

3.19

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.30]

3.20

陡峭指数RIX_{xx} ruggedness index；RIX_{xx}

对地形的一种测量，可定义为在超过高度差XX×(D + H)的给定扇区内高度差的百分比。

[来源：GB/T 33225—2016,3.31]

3.21

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。

[来源：GB/T 33225—2016,3.32]

3.22

标准不确定度 standard uncertainty

用标准差表示的测量结果不确定度。

[来源：GB/T 33225—2016,3.33]

3.23

扫掠面积 swept area

对于水平轴风机组，是指旋转风轮在垂直于旋转轴平面上的投影面积。

[来源：GB/T 33225—2016,3.34]

3.24

测量场地 test site

被测风力发电机组所在地点及环境。

[来源：GB/T 33225—2016,3.35，有修改]

3.25

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，星型/三角形或相似变换。

[来源：GB/T 33225—2016,3.36]

3.26

风切变 wind shear

与风向垂直的平面内风速的变化。

[来源：GB/T 33225—2016,3.37]

4 符号、单位和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

A	风轮扫掠面积	[m^2]
AEP	年发电量	
ASL	海平面以上	[m]
B	大气压	[Pa]
B_{10min}	测量气压的 10min 平均	[Pa]
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	
$c_{T,i}$	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}]
D	风轮直径	[m]
D_e	等效风轮直径	[m]
D_n	邻近运行风力发电机组的风轮直径	[m]
D_r	叶根直径	[m]
Elevation	海平面以上高程	[m]
$F(V)$	风速的瑞利累积概率分布函数	
f_i	第 i 个区间 V_i-1 与 Vi $(F(V_i)-F(V_i-1))$内风速的相对发生概率	
H	风力发电机组轮毂高度	[m]
K	冯卡门常数 0.4	
NT	风力发电机组的数量	
L	用风轮直径表示的风力发电机组和测风塔之间的距离（2.5 倍风轮直径）	
Lx	与来源 x 相关的贡献因子	
M	每个区间内不确定度分量个数	
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 8760h	
N_i	风速区间 i 内 10min 数据组个数	
N_j	风速区间 j 内 10min 数据组个数	
N_k	风速区间 k 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_{Test}	被测风力发电机组数量	
N	速度廓线指数（n=0.14）	
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	水蒸气压力	[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)]
RIX_{20}	给定方向区间内计算倾角的百分比超过 20%	
$S_{sc,i}$	第 i 个区间内风速比的标准差	
S	A 类不确定度分量	[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]
$s_{NTF,i}$	捕获数据集的统计不确定度	
$s_{\alpha,j}$	第 j 个区间内风速比的 A 类标准不确定度	[W]
$Slope_i$	相邻高程点间的倾角	[°]
T	绝对温度	[K]
T_I	湍流强度	
T_{10min}	测量绝对气温 10min 平均值	[K]
T	时间	[s]
U	B 类不确定度分量	
U_i	第 i 个区间内的合成 B 类不确定度	
u_{AEP}	年发电量估计的合成标准不确定度	[Wh]
$u_{AEP,AVG}$	平均年发电量的不确定度	[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]

uAEPRATIO	年发电量不确定度的比	[Wh]
$u$ano_class	风速计分级引起的不确定度	[W]
$u_{B,i}$	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]
$u_{c,m,i}$	风力发电机组 m 第 i 个区间内功率的合成不确定度	[W]
udFS,i	数据采集系统的不确定度分量	
udP,i	第 i 个区间内功率数据采集的不确定度分量	
udT,i	第 i 个区间内温度数据采集的不确定度分量	
udV,i	第 i 个区间内风速数据采集的不确定度分量	
udWD,i	第 i 个区间内风向数据采集的不确定度分量	
uFS	自由流风速的不确定度分量	[W]
U_i	第 i 个区间内的合成 B 类不确定度	
$u_{k,i}$	第 i 个区间内分量 k 的 B 类标准不确定度	[W]
$u_{m,k,i}$	风力发电机组 m 第 i 个区间内分量 k 的 B 类标准不确定度	[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	机舱风速的不确定度分量	
$u_{P,i}$	第 i 个区间内功率的 B 类标准不确定度	[W]
$u$sc	第 i 个区间内功率的 B 类标准不确定度	[W]
$u$sc,i,j	场地标定在风速区间 i 和风向区间 j 内的不确定度分量	[W]
$u_{T,i}$	第 i 个区间内气温的 B 类标准不确定度	[K]
$u_{V,i}$	第 i 个区间内风速的 B 类标准不确定度	[W]
$u_{V,k,i}$	第 i 个区间内风速分量 k 的标准不确定度	
uWD	风向不确定度	[°]
uWD,SENSOR	风向不确定度，在机舱上测得	[°]
uYAW	风向不确定度，偏航分量	[°]
$u$wind farm_AEP	风电场年发电量的总不确定度	[Wh]
$u_{\alpha,i,j}$	场地标定在风速区间 i 和风向区间 j 内中的合成标准不确定度	[m/s]
$u_{c,m,i}$	风力发电机组 m 第 i 个区间内功率的合成不确定度	[W]
V	风速	[m/s]
V_{ave}	轮毂高度的年平均风速	[m/s]
V_{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 个区间的标准化平均风速	[m/s]
$V_{\text{met},i}$	由机舱风速计确定的组 i 风速中气象塔风速的组平均值	[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]
$V_{n,k,j}$	第 k 个区间内数据组 j 的标准化风速	
V_{nacelle}	我们用来估算自由流风速的机舱风速计测量值	[m/s]

$V_{\text{nacelle},i}$	第 i 个区间内机舱风速平均值	[m/s]
$V_{10\text{min}}$	测量风速的 10min 平均值	[m/s]
${}^{v}P$	从功率输出推算的风速	[m/s]
X	下游障碍物到测风塔或风力发电机组的距离	[m]
Z	地面以上的高度	[m]
${}^{z}0$	粗糙长度	[m]
${}^{A}j$	风向区间 j 内的风速比（风力发电机组位置相对测风塔位置处）	
${}^{\Delta U}{}_{z}$	障碍物对风速偏差的影响	[m/s]
${}^{\Delta z}i$	相邻高程点间的垂直距离	[m]
P	相关系数	
$\rho_{k,l,i,j}$	第 i 个区间第 k 个分量与第 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	
$P_{k,m,i,l,j,n}$	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	
ρ_0	参考空气密度	[kg/m^3]
$\rho_{10\text{min}}$	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	
$\sigma_{P,i}$	第 i 个区间内标准化功率数据的标准差	[W]
$\sigma_{10\text{min}}$	参数 10min 平均的标准差	
$\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	纵向/横向/垂直风速的标准差	[m/s]
Φ	相对湿度（范围 0 至 1）	
Ω	角速度	[s^{-1}]

5 测量方法概述

本测量方法基于根据 IEC 61400-12-1 进行的基本功率特性测试，以及来自风力发电机组机舱的一些额外信号，包括风速和风向。

此类信号集能够在自由流风速信号和基于机舱的风速信号之间建立相关性。

自由流风速由测风塔上的风速测量得到。在复杂地形中，应使用 IEC 61400-12-3 场地标定程序校正测风塔测得的风速，以消除地形引起的气流畸变。

由于本方法与 IEC 61400-12-1 和 IEC 61400-12-2 密切相关，因此本文件中频繁引用这两份标准。

机舱风速传递函数测量程序旨在评估风力发电机组风轮对机舱风速的影响，并量化自由流风速与机舱风速之间的关系。建立机舱风速传递函数应通过与 IEC 61400-12-1 几乎相同的测量程序进行。除非本文件明确的与 IEC 61400-12-1 不同，否则应按照 IEC 61400-12-1 中的所有要求执行。

机舱风速传递函数的主要结果以表格或所有测量风速的气流修正因数的拟合函数的形式描述。其他结果是对这种修正因数的不确定度评估。该测量也可以提供信息来证明对测量扇区作出改变是允许的。机舱风速传递函数(NTF)详细流程图概述见附录 G。

6 机舱风速传递函数测量准备

6.1 概述

应在测量报告中详细说明与风力发电机组机舱风速传递函数测量相关的测试条件，详见第 10 章。

6.2 风力发电机组

如第 10 章所述，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。注意，机舱风速传递函数的有效性在一定程度上取决于此描述。

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。

根据 IEC 61400-12-2:2022 附录 A 进行的所有核查应该作为风力发电机组评估的一部分。

风力发电机组配置应按照第10章的详细要求进行报告。

6.3 测试场地

6.3.1 概述

测量场地的条件可能会显著影响机舱风速传递函数测量的不确定度和有效性。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量位置（风轮中心），虽然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。

应评估测量场地以确定影响气流畸变的来源，从而:

a) 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；

b) 确定场地条件，以帮助确定用于建立机舱功率曲线的机舱风速传递函数的有效性；

c) 评估气流畸变引起的功率曲线不确定度。

应特别注意以下因素：

a) 地形变化和粗糙度（根据 IEC 61400-12-1 定义）；

b) 其他风力发电机组；

c) 与风速和风电相关的湍流；

d) 障碍物（建筑物、树木等）。

两个因素尤为重要：

——第一，被测风力发电机组上风向的其他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。

——第二，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 61400-12-2:2022 和 IEC 61400-12-5:2022 中所述的程序确定。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信号——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下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，且满足其他地形分级有效性要求（见 6.3.2）的机舱风速传递函数才可能被采用。

如果需要根据 IEC 61400-12-1 的规定进行场地标定，则应按照 IEC 61400-12-3 的规定进行，并应用于参考测风塔风速。IEC 61400-12-3 场地标定程序允许进行下列更改：

a) 场地标定数据可以以捕获风速和风向变化的场地标定变化结果来评估。这会将气流修正值作为区间风速和风向的函数。为了保证每个 10° 风向区间内有合理的机会获得足够多的数据，可以使用 10° 宽的风向扇区和 4 m/s 的风速区间分区。风速以 2 m/s 加上 4m/s 的整数倍为中心；

b) 对于每个风向区间，可以对参考测风塔风速和临时测风塔风速做线性回归，以确定风速的变化，避免出现偏移，从而得到更好的场地标定结果。在存在偏移的情况下，气流校正系数在风向区间以拟合公式给出；

c) 可额外分析风向场地标定结果，以建立永久测风塔和临时测风塔的风向偏差，它是风速和临时测风塔风速和风向的函数。这个评估考虑的是风力发电机风轮对机舱风向和机舱风速的影响。通过使用机舱风速和风向传递函数可以得到更精确的结果。机舱风向传递函数可以用机舱风速传递函数相同的数据建立。但为了建立机舱风向传递函数，地形的影响应尽可能从风轮的影响中区分出来。风向的场地标定更关注偏移而不是比值。忽略地形和/或风轮对风向的影响将增加绝对风向的不确定度，因此减少了建立机舱功率曲线时的测量扇区

建立风速及可能的风向扇区的场地标定准确过程应详细记入报告并可检查，必要时可重复。所有场地标定结果的不确定度评估应给出并记入报告。

测量场地和测量扇区的情况应按第 10 章的详细要求进行报告。

6.3.2 地形分级

被测风力发电机组周围的地形应按照 IEC 61400-12-5 的规定进行分级。

由于机舱风速传递函数的有效性取决于（除其他方面外）地形分级，因此，应明确记录被测量的机舱风速传递函数在 IEC 61400-12-5 定义的五个地形级别中属于哪个级别。

6.4 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F是关于测试组织、安全和交流的导则。

7 测试设备

7.1 概述

根据 IEC 61400-12-1 的要求，应测量的信号包括：

a) 测风塔上的风速；

b) 测风塔上的风向；

c) 风力发电机组功率；（总功率，or 测试功率）

d） 电功率；（出口功率，or 机组状态信号功率）

e） 风力发电机组并网状态信号。

除 IEC 61400-12-1 的要求外，也应按照 IEC 61400-12-2 的要求测量下列信号：

a） 机舱风速；

b） 机舱风向；

c） 机舱偏航位置；

d） 气温；

e） 气压。

根据 IEC 61400-12-2 的要求，可采集下列信号：

a） 风轮转速；

b） 桨距角（单个或多个桨距角）；

c） 相对湿度。

除测量风轮转速和桨距角，也可以记录软件版本、相关参数和数值，以备将来进行的有效性核查。

机舱风向信号应进行现场验证，以确定正确运行，并建立起风向信号与机舱纵轴的具体关系。机舱偏航位置应被验证来确定正确运行和确定真北位置。

请注意，其中一些信号不需要被用来建立机舱风速传递函数，而是要执行 IEC 61400-12-2 中提到的自身一致性核查。

7.2 数据采集

数据采集系统可以是风力发电机组的外部部件，也可以是风力发电机组控制器数据系统或两者的组合。应使用每个通道的采样率至少为 1Hz 的数据采集系统来收集测量值和存储预处理数据。数据采集系统是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采集系统（即 SCADA 系统）可用于数据采集，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末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（传输，信号调理和数据存储）的校准和准确度，这些设备应按国家标准进行校准并溯源。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） 应计算每个信号完整数据链的不确定度；

d） 应正确处理风向 0 位附近的跳跃数据平均（360° ～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而无法满足 7.2 中的要求，则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的机舱风速传递函数。如第 10 章所详述，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、附录 C 和附录 D 所述，测量准确度可以用测量不确定度表述。测量期间，数据应周期性检查以保证测量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。

测量机舱风速传递函数的风力发电机组应当与使用该机舱风速传递函数并测量功率曲线的风力发电机组有相似的地形。如果不可能，则应在平坦地形测试机舱风速传递函数。

机舱风速传递函数测量程序旨在评估风力发电机组风轮对机舱风速的影响并且量化自由流风速与机舱风速之间的关系。建立机舱风速传递函数应通过与 IEC 61400-12-1 几乎相同的测量程序进行。除非本文件明确的与 IEC 61400-12-1 不同，否则应按照 IEC 61400-12-1 中的所有要求执行。

风速传递函数的主要结果以表格或所有测量 风速与气流修正因数的拟合函数的形式描述。其他结果是对这种修正因数的不确定度评估。测量也可以提供一些信息，来证明对允许的测量扇区作出改变。

根据6.3，应根据地形级别对有效扇区建立合适的机舱风速传递函数。如果没有完成，则应进行风力发电机组评估（见6.2）、场地评估和地形分级（见6.3）。与6.4类似，应编写一个测试计划，其中包括测量准备、传感器和测量设备的选择及其他相关信息。对于数据采集系统，7.2应适用。

8.2 数据系统同步

如果用多于一个的数据采集系统测量信号，所有系统在整个测试期间应保持同步。任意两个数据采集系统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。

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。

8.3 数据采集

应以 1Hz 或更高的采样速率连续采集数据。数据采集系统应至少存储所有信号的下列统计数据：

a) 10min 平均值；

b) 10min 标准偏差；

c) 10min 最大值；

d) 10min 最小值。

如果不是所有信号都能记入风力发电机组的数据采集系统，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。其他信号存储 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 8.7 的要求。

标准分析将基于测试数据的 10 分钟统计值进行。这样选择的目的是为了所得测量结果与 IEC 61400-12-1 的结果密切关联。

需要注意，10min 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 10min 周期数据。对于将平均时间缩短至小于 10min，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统计数据报告测试结果，但也允许以更短的平均时间进行报告及分析。当使用更短平均周期的数据时，需核查所应用的传递函数的有效性。

8.4 数据质量核查

8.4.1 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。8.4.2 至 8.4.5 列出了质量核查示例，但不包括所有可能要求的方法。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 6.2 的描述中。

8.4.2 测量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允许的数据。这些剔除应按第10章的要求描述。

8.4.3 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他传感器影响显著的数据）。除利用自动检测手段，宜手动检查测量数据（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、风力发电机组相对测风塔的偏航位置与邻近测量的风向的比较）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 章的要求记入报告。

8.4.4 确保数据采集系统正常运行

应采取步骤验证数据采集系统在整个测量期间是否正常运行。这些步骤包括但不限于：

a) 确保数据记录不重复；

b) 研究任何测量数据不连续的原因；

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。

8.4.5 扇区自身一致性核查

一旦得到（初步的）机舱风速传递函数，应按 9.3.3 进行扇区自身一致性核查。

8.5 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。

下列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，准确的数据筛选应记入报告）；
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) 测量仪器的故障或降级（例如由结冰引起）；
6) 10min 风向在 IEC 61400-12-5 规定的测量扇区之外；
7) 叶片结冰事件和机舱覆雪；
8) 风力发电机组故障引起风力发电机组停机；
9) 风力发电机组手动停机或测量或维护模式运行。

其他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记入报告。

8.6 数据修正

对于所选数据组，应进行下列数据修正：

a) 根据风力发电机组轮毂海拔高度修正气压值(如果 7.2 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) 应使用有效的机舱风速传递函数方法将机舱风速修正至自由流风速；
f) 对数据的任何其他修正应在报告中明确指出。数据的修正细节应当按照第10章的详细要求进行报告。

8.7 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“实测 AEP”大于或等于 95%“外推 AEP”(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 0.25m/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 30min 的采样数据；
b) 数据库包含至 180h 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%。需要注意的是，8.7 中提到的机舱功率曲线是在测量机舱风速传递函数时测得的。

数据库应在测量报告中呈现，详见第10章。

9 推导出的结果

9.1 推导出的结果概述

推导出的结果如下：

a) 风速以 V_{free} 与 $V_{nacelle}$ 构成的区间数学函数表示的机舱风速传递函数；

b) 风速的场地标定（按 IEC 61400-12-1 的要求），表示为：

1) 每个风向区间的气流校正系数，或

2) 每个风速和风向区间的气流校正系数，或

3) 每个风向区间的线性回归参数。

c) 可选择性地推导出风向的机舱风速传递函数表示为风速区间的偏移或机舱风速的数学函数；

d) 可选择性地推导出风向的场地标定结果，定义如下：

4) 每个风向区间的偏移，或

5) 每个风向和风向区间的偏移，或

6) 按每个风向区间的线性回归参数。

e) 根据 9.3.3 的自我一致性核查结果；

f) 根据第 10 章的所有派生结果的不确定性分析；

g) 根据第10章的机舱风速传递函数报告。

9.2 测量机舱风速传递函数的确定

测量机舱风速传递函数是对标准化后的数据组用“区间法”确定的，即用 0.5m/s 的区间，依据公式(1)、公式(2)对每一风速区间计算标准化后的平均风速和标准化后的机舱风速平均值得到：

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

$$V_k = \frac{1}{N_k}\sum_{j=1}^{N_k} V_{n,k,j} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

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；

V_k ——第 k 个区间标准化平均机舱风速；

$V_{n,k,j}$ ——第 k 个区间数组 j 标准化机舱风速；

N_i ——第 i 个区间 10min 数组的个数；

N_k ——第 k 个区间 10min 数组的个数。

测风塔风速和机舱风速应按 IEC 61400-12-1 所述的方法分区间，其中测风塔风速是 x 轴方向的风速。区间之间可以用线性插值。利用数据库中的数据，V_{free}应按下列公式计算：

$$V_{free} = \frac{V_{free,i+1} - V_{free,i}}{V_{nacelle,i+1} - V_{nacelle,i}} \cdot \left(V_{nacelle} - V_{nacelle,i}\right) + V_{free,i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3)$$

式中：

$V_{\mathrm{nacelle},i}$ 和 $V_{\mathrm{nacelle},i+1}$ ——区间 i 和区间 i+1 中机舱风速的区间平均值；

$V_{\mathrm{free},i}$ 和 $V_{\mathrm{free},i+1}$ ——区间 i 和区间 i+1 中测风塔风速的区间平均值，如适用，则气流修正系数应采用场地标定测量值；

$V_{nacelle}$ ——机舱风速计的实测值，用于估算自由流风速；

V_{free} ——采用实测机舱风速和测风塔风速估算并针对地形引起的气流畸变修正后的自由流风速(分别为($V_{nacelle}$ 和 V_{free})。

机舱风速传递函数定义为每个区间内机舱风速 $V_{nacelle}$ 作为 V_{free} 的函数。NTF 只在最低风速区间至最高风速区间内有效，不允许进行 NTF 外推。

或者，以 V_{free} 为 y 轴以 $V_{nacelle}$ 为 x 轴的函数可以用数学函数拟合。应考虑拟合过程中各参量的权重，例如充分考虑离散。在报告中应指出如何进行拟合,用了什么拟合函数，以及拟合结果的不确定度权重。

相似的程序也用来建立风向的 NTF，程序将注重偏移而不是比值。

功率曲线的测量应在第10章中详细说明。

9.3 数据质量核查

9.3.1 概述

应按 8.4 进行数据质量核查。

此外,通过绘制或审查相关信号的散点图来验证测风塔设备和测量场地布局的描述是正确的。例如:

a) 绘制主次风速计比值的 10min 平均值与风向的关系图(按 IEC 61400-12-1 规定)

b) 通过这些文档的散点图比较安装结构(单一风速计安装方式)的位置(与真北或其他参考方向的度数)或者主次风速计尾流位置(双风速计安装方式)。

这些散点图也可以用来比较风力发电机组尾流中心与其期望值来验证风力发电机组对测风塔的方位。

对发现的差异都应进行研究并分析修正。未解决的差异应在测试报告中体现。

9.3.2 方向稳定性核查

在某些风向内，实测传递函数可能出现较大的变化。这可能是当地地形引起的,但也可能是非主风向的风波动较大。推荐按下列方法分析传递函数随风向的变化。

传递函数所基于的数据组应按 10° 风向扇区划分，以 10° 的整数倍为中心。如果之前做了场地标定，宜利用相同的风向区间以反映传递函数在场地标定的方向效应。$V_{free}/V_{nacelle}$ 应该按每个区间平均，$V_{free}/V_{nacelle}$ 的标准差应该按每个方向进行计算。应选择已经完成上述程序的风速范围以进行 10min 平均,以便排除具有合适边际的重要变桨动作。作为稳定性核查的部分推荐比较残值。

平均值和标准差应按区间平均风向画出，该图将表示出传递函数是否对风向敏感。如果风向效应明显，则测量扇区应减小到那些平均值和标准差是常值的扇区范围。

对于已经减小的扇区，按9.3.3所述做的自身一致性核查应表明新机舱风速传递函数改进的证据。

9.3.3 利用机舱功率曲线进行机舱风速传递函数自我一致性核查

机舱风速应该用建立的传递函数进行修正，功率曲线和 AEP 应按修正后的风速计算。或者，机舱风向应按已建立的机舱风向传递函数修正。注意，该章节中的机舱功率曲线是机舱风速传递函数测试期间的机舱功率曲线。

功率曲线和 AEP 应根据 IEC 61400-12-1 规定的测量和程序进行，不同之处在于，它使用在网风力

发电机组信号进行剔除，具有有效测量数据的同一数据库应用于分析两者对风速范围的限制，确保两者使用相同的风速范围。

两个结果都应按区间功率曲线和 AEP 进行比较。每个区间最大功率偏差应为区间功率的 1%或额定功率 0.5%之中的大值。AEP 最大偏差应是按 9.3 得到的轮毂高度年平均风速 4m/s～11 m/s 的 1%。

如果自我核查不满足上述标准，应研究问题产生的原因并修正或者考虑使用另一个机舱风速传递函数。如果偏差根源不能确定，只要区间功率的偏差小于3%或额定功率1.5%的较大值，且AEP的最大偏差小于按9.3得到的轮毂高度年平均风速4m/s～11m/s的3%时，应评估附加不确定度，并计入报告。如果区间功率的偏差大于3%或额定功率1.5%的较大值，需要重新做一个测试。

9.4 不确定度分析

机舱风速传递函数的不确定度应根据附录 B、附录 C 和附录 D 进行计算。

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。本文件将报告和文档作了区分。测量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/IEC 17025 的要求，一般为 10 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。

测量报告应至少包括以下信息：

a) 测量场地描述（见本文件 6.3 条），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测量场地地图，并指明地形，风力发电机组、测风塔和有影响障碍物的位置，其他风力发电机组，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，包括不同方向倾角评估；
   6) 现场空气密度。
b) 测量设备描述，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，按照附录 A 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、温度和气压端到端校准的结果。
c) 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 8.5 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。

d) 机舱风速传递函数测量数据的表示：

1) 机舱风速传递函数的测量数据应以图 1 和表 1 的形式呈现；

2) 图和表格都应说明用于标准化的参考空气密度。

e) 测量不确定度：

应按附录 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。

f) 与测量程序的偏离：

任何与本文件要求的偏离都应当在测量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。

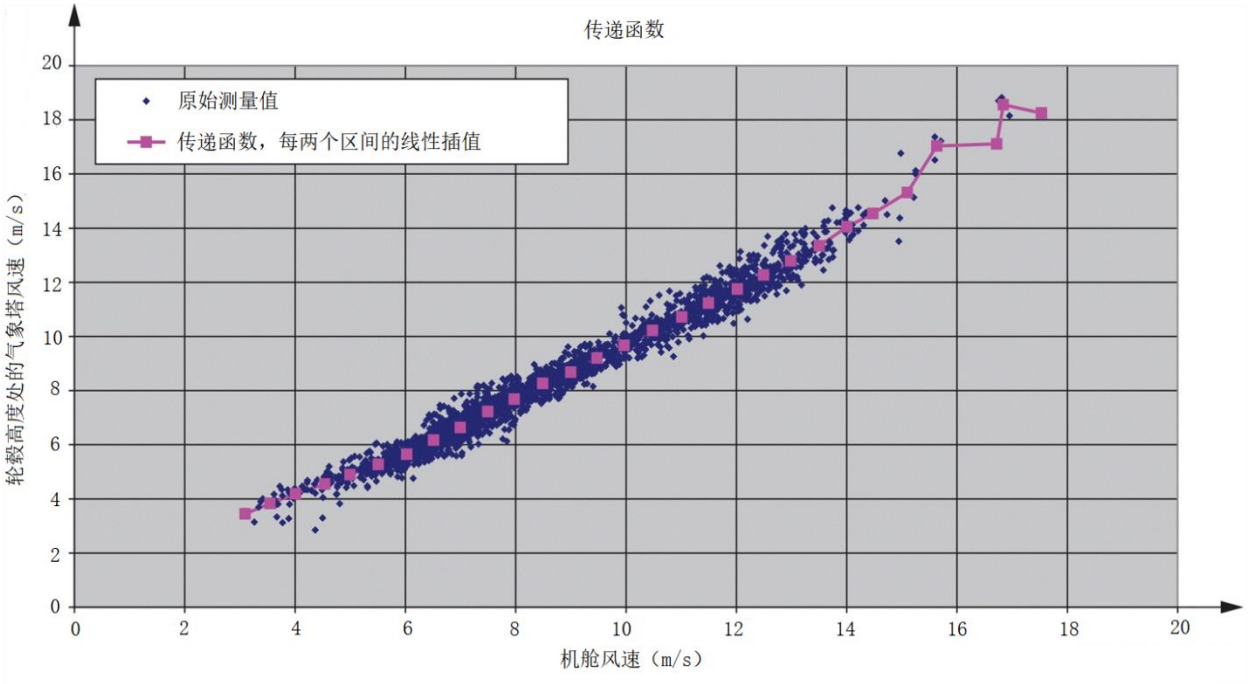


图 1 机舱风速传递函数

表 1　基于测风塔数据实测功率曲线表示例（用于一致性核查）

风力发电机组+测风塔							
标准空气密度：1.225kg/m^3					A 类 标准不确定度 s_i kW	B 类 标准不确定度 u_i kW	合成不确定度 标准不确定度 u_{ci} kW
区间编号	轮毂高度处的风速 m/s	功率输出 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	498.8	0.418	240	4.46	46.40	46.62
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	12.5	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	2 462.5	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

风力发电机组+测风塔							
标准空气密度：1.225kg/m^3					A 类 标准不确定度 s_i kW	B 类 标准不确定度 u_i kW	合成不确定度 标准不确定度 u_{ci} kW
区间编号	轮毂高度处的风速 m/s	功率输出 kW	C_p	数据组数			
31	15.72	2472.0	0.183	3	0.56	32.27	32.27

附录A
（资料性）
机舱设备安装

A.1 概述

测量设备在机舱上的合理安风力发电机组测量的精确度由重要作用。特别是风速计应该安装在气流畸变最小的位置，尤其应避免横担产生的气流畸变影响。风速计的安装位置应能使其不受风力发电机组设置和因周围复杂地形引起的气流畸变影响。机舱上的其他设备和物体应避免对风速计造成干扰。

A.2 推荐的风速计安装方法

推荐的风速计安装方法是将其安装在一个附近没有其他仪器或设备的垂直管上。为实现安装引起的风的测量畸变达到可忽略不计的程度，应该严格遵守本附录 A.2 的所有规定。风速计应安装在垂直圆管上，圆管外直径与标定时的直径相同，风速计电缆在圆管内。垂直方向的倾角不超过 2°，在风速计安装时，推荐使用倾斜计进行验证。管径不应大于风速计本体的直径，连接风速计与垂直管的支架应当密实、平滑且对称。

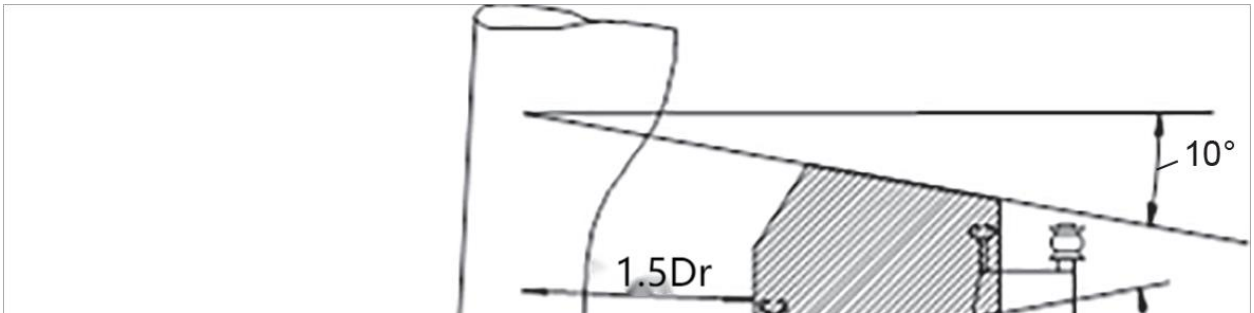
A.3 推荐的风速计安装位置

风速计应位于机舱的对称面内，发生机舱位移或振动最小的地方。如有可能，一个候选位置是在塔筒中心的延长线上。

机舱风速计应安装在由机舱引起的边界层以上，图 A.1 给出了示例。其安装位置应当在从圆柱形叶根到叶片剖面引起叶片涡影响区以外，图 A.1 中 10° 线以上灰色区域。此外，传感器应当安装在圆柱形叶根后面，距该中心至少 1.5 倍叶根直径的位置，且不应将其安装在栏杆的下风向或传感器及警告灯的尾流内。也不应安装在机舱尾部下风向 1m 内。

风速传感器可以轴线为中心，安装在轮毂罩伸出的杆上的一定距离（基于工程经验决定）处。如果传感器的测试原理是基于测量流过轮毂罩的气流，那么它可以安装在轮毂罩表面，也可安装在叶根中心之前至少 0.6 倍叶根直径处。

图 A.1 给出了推荐的风速计安装位置。图中 D 用于叶根直径。



注：风速计应安装在画有阴影线的区域。

图 A.1　风速计在机舱顶部的安装

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/277106035160006113